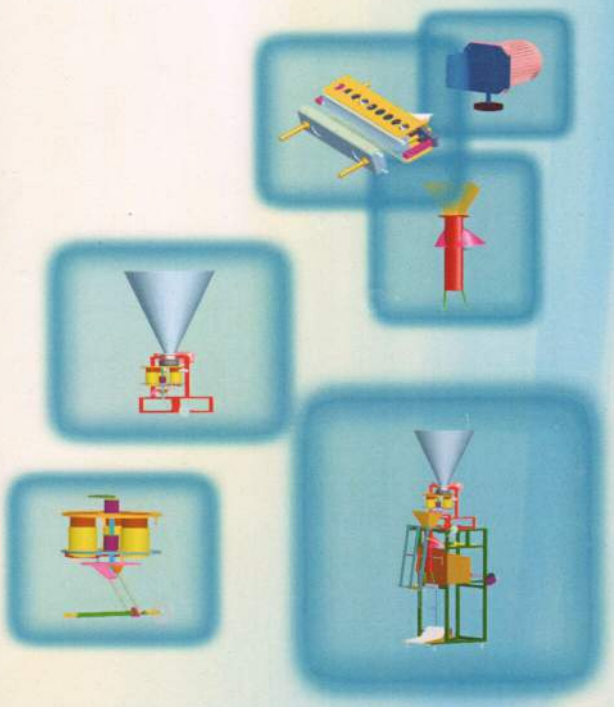
Б.О. Пальчевський
О.М. Шаповал
О.А. Великий



ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ СИНТЕЗ ФУНКЦІОНАЛЬНО-МОДУЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ПАКУВАЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ

Луцьк 2013

ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ СИНТЕЗ ФУНКЦІОНАЛЬНО-МОДУЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ПАКУВАЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ

Монографія

За редакцією проф.Б.О.Пальчевського

Рекомендовано Вченою радою
Луцького національного технічного університету

Луцьк
Редакційно-видавничий відділ
Луцького національного технічного університету
2013

УДК 621.798.002.5(066)
ББК 34.687.в6
П 14

Пальчевський Б.О. , Шаповал О.М., Великий О.А.
Оптимізаційний синтез функціонально-модульної структури пакувального устаткування: Монографія / За редакцією проф. Б.О.Пальчевського. – Луцьк: Луцький НТУ, 2013. – 165 с.

Особливістю монографії є представлення основ побудови функціонально-модульної структури пакувальних машин та методів її проектування з використанням сучасних інформаційних технологій комбінаторного структурного синтезу і оптимізації. Розроблена методика автоматизованого проектування включає генерування варіантів і оптимізацію компоновки технологічного обладнання, її твердотільне віртуальне моделювання, а також отримання на основі цих моделей робочої документації. У даній монографії вперше описано поєднання системного підходу і функціонально-модульного представлення технологічного устаткування з використанням основних інформаційних технологій проектування, їх процедур та операцій. Показано на чисельних прикладах їх практичне застосування для проектування конкретних видів технологічного устаткування для пакування сипких речовин.

Для наукових працівників, аспірантів, інженерних працівників, що займаються проектуванням технологічного обладнання.

Бібл. 111 назв.

Рецензенти:
Стоцько З.А., доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка»

Марчук В.І., доктор технічних наук, професор, Луцький національний технічний університет

Рекомендовано до видання Вченою радою
Луцького національного технічного університету
Міністерства освіти і науки України,
(протокол № 10 від 30 травня 2013 р.)

ISBN 978-617-672-038-6
© Пальчевський Б..О., 2013

ВСТУП

Вдосконалення технологічного устаткування супроводжується зростанням його складності (в середньому вдвічі кожні 15 років). При цьому виникає ряд протиріч, що стримують їх розвиток. Відмітимо два основних: 1) переважання темпів зростання складності технологічного устаткування над темпами розвитку методів його проектування; 2) погіршення співвідношення між тривалістю розробки та часом морального старіння (в XX столітті продуктивність праці зросла в 10 раз, а продуктивність проектування – тільки на 20%). Як бачимо, науково-технічний прогрес в галузі машинобудування характеризується випередженням розвитку технологічного устаткування порівняно з розвитком методів його проектування.

Під час створення нових зразків технологічного устаткування конструктор, що орієнтується на існуючі зразки обладнання, навіть найкращого закордонного, автоматично приречений на відставання. Можна з впевненістю стверджувати, що конкурентоспроможність технологічного устаткування в значній степені визначається на стадії його проектування, ефективність якого безпосередньо пов’язана з якістю процесу проектування, рівнем його автоматизації.

При створенні нового технологічного устаткування (технологічних машин і технологічних ліній) виникає проблема забезпечення їх високої якості. Забезпечити при проектуванні задану якість машини при її найменшій собівартості є достатньо складним завданням.

Системний підхід до проектування передбачає представлення технологічного обладнання як системи, що виконує задану службову функцію, а елементами її структури виступають функціональні модулі.

Використання функціонально-модульної системи побудови обладнання забезпечує можливість його швидкого перекомпонування і переналагодження як при проектуванні, так і при експлуатації.

Однак широке впровадження функціонально-модульного принципу в системах автоматизованого проектування стримується відсутністю надійної методики проектування обладнання функціонально-модульної будови.

Не викликає сумніву, що ця методика повинна ґрунтуватися на використанні таких інформаційних процедур як структурний синтез компонувань, їх моделювання та вибір кращих. Процедури синтезу та

вибору кращих компоновок модульного обладнання відрізняються від традиційних методів проектування орієнтованістю на широке застосування комп'ютерних технологій.

Мета створення нових методів проектування є підвищення якості проектів, зниження матеріальних витрат, скорочення термінів проектування, підвищення продуктивності праці проектантів шляхом використання на всіх етапах комп’ютерної техніки. Виявленням закономірностей проектування як виду науково - технічної діяльності повинна займатися спеціальна наукова дисципліна, яка об’єднує використання інформаційних технологій з системним підходом до проектування технологічного устаткування функціонально - модульної будови.

Автоматизоване проектування будь-якого технічного об'єкту — це створення, перетворення і представлення в прийнятій формі образу цього ще не існуючого об'єкту в результаті його генерування за деякими алгоритмами при взаємодії людини і ЕОМ. Метою функціонування САПР є процес переробки інформації вихідного опису об'єкту в інформацію, що оформляється в вигляді робочого проекту. Як бачимо, в основу процесу проектування покладено усвідомлене використання інформаційних технологій.

.

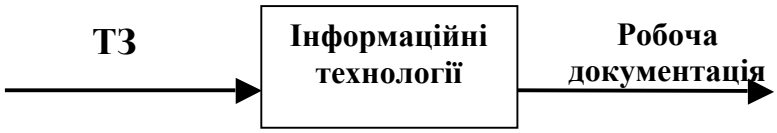


Рис.0.1. Схема використання інформаційних технологій при проектуванні

При проектуванні інформаційні технології розглядаються як система процесів накопичення і обробки інформації, необхідної для створення робочої документації. Вони забезпечують створення, обробку, передачу, відображення і зберігання інформації. Інформаційні технології грають ключову роль в процесах отримання, накопичення, поширення нових знань по конкретних напрямах. При проектуванні технологічного устаткування широко застосовуються інформаційні технології, включаючи методи візуалізації аж до використання систем віртуальної реальності.

Для того, щоб дана монографія була корисною, вона повинна ґрунтуватися на конкретних прикладах. В зв’язку з цим вибрано ряд

прикладів, в основному, із проектування технологічних машин для пакування сипких продуктів.

Монографія складається із пяти розділів.

В *першому* розділі описано основні принципи побудови системи автоматизованого функціонально-модульного проектування пакувальних машин.

В *другому* розділі показано особливості функціонально-модульної будови технологічного устаткування як об'єкта проектування. Наведено технологічні принципи їх побудови та критерії оцінювання їх характеристик, типові функціональніі пристрої пакувальних машин.

В *третьому* розділі показано особливості формалізації опису і моделювання структури пакувальних машин.

Четвертий і п'ятий розділи присвячені описові послідовності процедур оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури технологічного устаткування, а також показано їх взаємозв'язок під час пошуку оптимальних технологічних рішень, наведені приклади оптимізації компонувань машин для пакування сипких продуктів

Автори з вдячністю врахували зауваження та побажання рецензентів щодо підвищення якості монографії. Всі критичні зауваження будуть прийняті з вдячністю.

РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи функціонально-модульного проектування пакувальних машин

1.1. Загальні положення процесу проектування

Проектування – це процес створення опису, необхідного для виготовлення в заданих умовах ще неіснуючого об'єкта. Опис задає конструкцію об'єкта як сукупність його властивостей, які характеризують склад його частин, призначення, взаємну розташованість, форму, розміри і матеріали складових частин та види з'єднання їх між собою. Цей опис може створюватися в уяві проектувальника як результат творчого процесу або синтезуватися за певним алгоритмом при взаємодії проектувальника і ЕОМ.

Процес проектування починається із появи потреби суспільства в певному технічному об'єкті, яка конкретизується технічним завданням на службове призначення об'єкта. Якщо об'єктом проектування виступає технологічна машина (ТМ), то поняття правильності проекту передбачає відповідність створюваної машини об'єкта деякій сукупності формалізованих еталонних характеристик і правил, що визначають її службове призначення.

Технічне завдання (ТЗ) на проектування машини – це документ, що встановлює основне призначення машини, показники її якості, техніко-економічні та спеціальні вимоги до неї та до обсягу, стадій розробки і складу конструкторської документації. Воно розробляється відповідно до вихідних вимог замовника з використанням результатів науково-дослідних робіт, наукового прогнозування, аналізу вітчизняних і світових досягнень науки і техніки, патентних матеріалів тощо. Основну частину технічного завдання складають функціональні критерії і характеристики.

Традиційний погляд на технічне завдання як список вимог до службового призначення машини полягає в тому, що вона представляє собою документ на звичайній мові, який є інтерфейсом між замовником і виробником. Існує декілька способів задання технічного завдання.

Технічне завдання як опис. Замовник видає технічне завдання, щоб виробник міг надати йому ту машину, яку він хотів би мати. В принципі, в описі необхідно вказати, що повинна і що не повинна

робити машина. На практиці зазвичай вважається, що машина повинна робити те, що уточнено в технічному завданні, і не повинна робити нічого більше.

Технічне завдання як припис. Виробник дивиться на специфікований документ як на набір складових частин, які необхідно скласти, щоб вирішити проблему замовника. При цьому замовник задає мінімально прийнятне, а виробник – максимально потрібне.

Технічне завдання як модель. Строге представлення про технічне завдання дозволяє трактувати його як модель машини. Така модель дозволяє провести прогнозний аналіз, який, окрім іншого, забезпечить припинення розробки проекту машини, якщо вона в принципі не здатна задовольнити вимоги службового призначення. Основна перевага використання формальної моделі машини полягає в можливості створення моделі машини, яка дозволяє виявити такі особливості поведінки машини, які інакше стали б очевидними тільки на пізніших стадіях її створення.

Результатом проектування буде комплект конструкторської документації, який містить потрібні дані, згідно з якими розробляють, виготовляють, контролюють, приймають, постачають, експлуатують та ремонтують машину. До неї належать графічні і текстові документи, що містять усі дані про склад і будову машини, а також про її розробку, виготовлення, контроль, експлуатацію.

Перехід від технічного завдання до комплекту конструкторської документації здійснюється в декілька послідовних стадій, на яких розробляються проміжні описи машини на різних рівнях деталізації: *технічне завдання − технічна пропозиція − ескізний проект − технічний проект – комплект конструкторської документації.*

Технічна пропозиція – проектна конструкторська документація, яка містить технічне і техніко-економічне обґрунтування доцільності розроблення машини на підставі аналізу технічного завдання та опрацювання можливих варіантів конструкції.

Документація технічної пропозиції включає креслення загального виду, відомість технічної пропозиції і пояснювальну записку. Вона є основою для розробки ескізного і технічного проектів.

Ескізний проект – проектна конструкторська документація, яка містить принципові конструктивні прив’язки, достатні, щоб отримати загальну уяву про конструкцію та принцип дії машини, а також дані,

що визначають її відповідність призначенню, основні параметри та габаритні розміри.

Конструкторські документи містять принципове конструкторське рішення, що дає уявлення про будову і принцип роботи машини, її основні параметри і габарити.

Розглядають варіанти можливих технічних рішень, оцінюють технологічність і патентну чистоту машини.

Документація включає креслення загального вигляду, відомість ескізного проекту і пояснювальну записку.

Технічний проект – проектна конструкторська документація, яка містить остаточні технічні розв'язки, що дають повну уяву про конструкцію розроблюваної машини, та початкові дані для розроблення робочої конструкторської документації. Документи включають загальний вигляд машини, відомість технічного проекту і пояснювальну записку.

Робоча конструкторська документація за рівнем повноти опису розділяється на:

- основний конструкторський документ, який окремо чи разом з іншими зазначеними в ньому конструкторськими документами повністю і однозначно визначає певний виріб та його склад. Це буде робоче креслення для деталей, а для складальних одиниць та комплексів – специфікація;
- основний комплект конструкторських документів, що стосуються машини в цілому. Це буде загальний вигляд машини, електрична чи кінематична схема, технічні умови тощо;
- повний комплект конструкторських документів складається з основного комплекту конструкторських документів на машину й основних комплектів конструкторських документів на її складові частини виробу, застосовані згідно зі своїми основними конструкторськими документами.

Проектування таких складних об'єктів, якими є технологічні машини, ґрунтується на застосуванні певних принципів, найбільш загальним з яких є системний підхід та функціонально-модульний принцип проектування [37].

1.2. **Розвиток теорії функціонально-модульного проектування технологічних машин**

Модульний принцип проектування давно і широко застосовується в різних галузях промисловості, однак у літературі можна зустріти різноманітні поняття модуля, модульного принципу, які часто суперечать один одному, також відсутня однозначна класифікація модулів.

Вимоги виробництва призвели до виникнення ідеї модульної технології. Згідно з цією ідеєю технологічний процес розчленовується на елементарні технологічні переходи, відповідно до яких формується набір модулів згідно із завданням синтезу технологічного процесу (ТП) [6, 7].

В якості основи структури функціональних модулів та технічної системи в вводиться уніфікований модуль перетворення (УМП) − структурно-закінчена частина моделі машинного технологічного процесу на рівні системи зв’язків, яка реалізує певну функцію. У відповідності з цим модель технологічного процесу представляється як система функціональних, часових, кінематичних, геометричних, структурних та розмірних зв’язків. Таким чином, в дається алгоритм переходу від немодульного обладнання до модульного, тобто метод модульної декомпозиції [28].

Спроба систематизувати та узагальнити результати робіт по застосуванню модульного принципу в різних галузях промисловості привела до необхідності строгого і єдиного поняття модульного принципу в техніці, в зв’язку із чим запропоновано наступне його трактування: “Модульний принцип − особливість побудови технічних систем, що полягає в підпорядкуванні їх розмірів проектному модулю (модулям) і (або) у забезпеченні можливості комплектування різноманітних складних нестандартних технічних систем з великим відмінностями характеристик з невеликої, економічно обґрунтованої кількості типів і типорозмірів однакових первинних (типових або стандартних) “модульних елементів” [13].

Проте, до такого формулювання висунуто ряд критичних зауважень. Зокрема відзначається, що модульний принцип полягає не в забезпеченні можливості комплектування, а в самій реалізації цієї можливості. Крім того, введено термін “компонування” замість “комплектування”, оскільки перше ближче до структури системи, а

друге характеризує забезпеченість системи необхідним набором елементів. У результаті запропоновано формулювання модульного принципу як методу побудови різних технічних систем з різноманітними характеристиками шляхом компонування їх з типових модулів обмеженої номенклатури [7].

Модульний метод побудови ТМ дозволяє розширити їх технологічні можливості. Однак ефективність застосування даного методу не скрізь однакова. Вирішальне значення має та обставина, які принципи покладені в основу функціонально-модульної побудови, тобто наскільки обґрунтовано вибрані системні принципи проектування. У зв'язку із цим виділяють сім системоутворюючих принципів організації дискретних технологічних систем зі змінюваною структурою [28]:

1. Принцип автономності − конструктивна і функціональна самостійність елементів системи, забезпечення ними типових функцій, уніфікація механічного, енергетичного та інформаційного інтерфейсів.

2. Принцип варіативності − можливість ефективної зміни конфігурації структури обладнання і транспортних потоків під необхідні технологічні завдання.

3. Принцип відкритості − можливість нарощування функцій вбудовуванням будь-якого технологічного обладнання та сумісність з іншими виробничими структурами.

4. Принцип надмірності − формування верхнього рівня системи з модульних комплектів, орієнтованих на комплексні ТП.

5. Принцип достатності − забезпечення раціонального ТП обладнанням з мінімальною кількістю функцій, шляхом виключення з модульних комплектів невикористовуваних елементів.

6. Принцип зосередження та розподіленості функцій − включення в систему модулів, які легко поєднуються в необхідних сполученнях і можуть також використовуватися автономно або в суміжних підсистемах на різних рівнях.

7. Принцип цілісності − переважання системозберігаючих факторів в ТП над системоруйнівними.

Слід зауважити, що не всі з наведених принципів є не залежними, а їх зміст не дає можливості для оцінки ступеня виконання цих принципів для конкретної модульної системи.

На рис. 1.1 показаний варіант системи принципів організації систем зі змінною структурою. Перший рівень містить три основні принципи: варіативність, повнота, надмірність. Необхідність виконання цих трьох принципів для довільної модульної системи очевидна. Дійсно, варіативність − здатність до зміни структури і функцій обладнання − закладені в самому понятті системи зі змінною структурою [31].

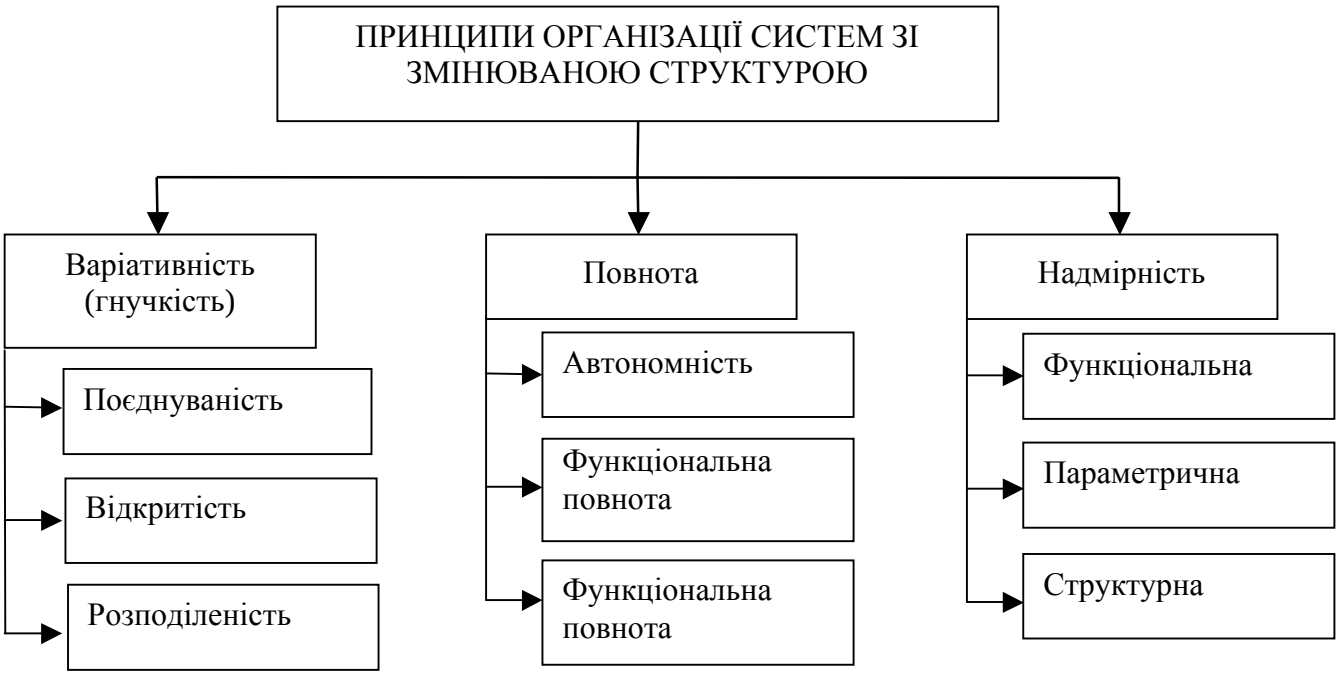


Рис. 1.1. Принципи організації системи зі змінною структурою

Під повнотою мається на увазі вирішуваність всіх виробничих завдань заданого класу за допомогою елементів аналізованої системи, без чого остання не забезпечувала б свого призначення.

Нарешті, надмірність дозволяє здійснювати вибір варіантів обладнання на основі структурної та параметричної оптимізації, без чого система зі змінною структурою також позбавляється сенсу.

Для обґрунтування достатності трьох основних принципів проведена декомпозиція кожного з них на складові другого рівня.

Принцип варіативності поділяється на три складові: поєднуваність, відкритість та розподіленість.

Поєднуваність характеризує основний метод, яким досягається варіативність, у відповідності з яким система зі змінною структурою утворюється шляхом стикування модулів і проміжних компонувань системи.

Відкритість − необов'язковий, але бажаний принцип, що забезпечує додатковий спосіб зміни обладнання за рахунок включення в систему зі змінною структурою нових модулів і її поєднання з іншими системами обладнання спорідненого виробничого призначення.

Розподіленість характеризує системоутворюючу ефективність систем зі змінною структурою, що дозволяє виконувати виробничі завдання фіксованого класу за рахунок поєднання обмеженого числа модулів.

У свою чергу основний принцип повноти модульної системи поділяється також на три складові: функціональну і параметричну повноту, та автономність.

Функціональна повнота характеризує здатність модульної системи забезпечити всі типові функції заданого виробництва.

Параметрична повнота доповнює функціональну перекриттям компонуваннями модульної системи всіх заданих діапазонів параметрів, що характеризують кожну з реалізованих функцій.

Під автономністю розуміється незалежність об'єктів системи від зовнішнього по відношенню до неї обладнання, в тому числі енергетичного та інформаційного.

Як випливає з рис. 1.1, для модульної системи можна ввести три види надмірності. Функціональна і параметрична надмірність відносяться до модулів системи. У відповідності з цим одна і та ж типова функція може реалізовуватися декількома модулями (функціональна надмірність) в межах одного і того ж діапазону параметрів цієї функції (параметрична надмірність).

Очевидно, що реалізація зазначених принципів можлива лише на основі функціонально-модульної побудови технічних систем.

Функціональний модуль (ФМ) – це конструктивно і функціонально закінчена одиниця, що є складовою частиною ТМ; повторюваний уніфікований вузол, що виконує самостійну функцію в різного роду технічних системах.

Функціонально-модульне проектування ТМ в сучасному його розумінні виникло як результат застосування принципів системного

підходу до будови ТМ, який полягає в розгляді частин складних явищ-процесів та систем-машин з врахуванням їх взаємодії. Проектування виступає як комплексна проблема, в якій у складному взаємозв'язку переплітаються завдання синтезу, моделювання, аналізу, оцінки, оптимізації. Для вирішення таких складних завдань необхідне застосування методології системного підходу.

При використанні методології системного підходу для формалізації процесу проектування слід виходити з того, що специфіка складних об'єктів і процесів не вичерпується особливостями складових його частин і елементів, а поміщена в характері зв'язків і відносин між ними. Системний підхід включає в себе виявлення функціонально-модульної структури ТМ, типізацію зв'язків між ФМ, визначення атрибутів, аналіз впливу зовнішнього середовища.

Структура системи – це сукупність елементів і зв'язків між ними. При описі структури характеризують лише типи елементів і зв'язків між ними. При **аналізі** розв'язується задача визначення функціонування системи із заданою структурою, а при **синтезі** – визначення структури системи, яка забезпечить задане функціонування.

Синтез є проектною процедурою, метою якої є з'єднання різних елементів, властивостей, сторін і т.п. об'єкта в єдине ціле, системою. В результаті синтезу створюються проектні рішення, що володіють новою якістю щодо своїх елементів. Залежно від виду елементів розрізняють систему типу "процес", елементами якої є елементарні операції, та систему типу "об'єкт", елементами якої є об'єкти. Технологічна машина об'єднує в собі обидва типи систем: структура технологічної операції, що описує функцію машини, входить до системи типу "процес", а сукупність деталей і вузлів машини – до системи типу "об'єкт".

При проектуванні машини першим етапом є її функціональний аналіз. Результати цього етапу необхідні для об'єктивного розбиття завдання проектування на частини і визначення стратегії рішення загальної задачі проектування.

Створення машинного обладнання на основі функціонально-модульного принципу дозволяє із обмеженого набору ФМ створювати різні його компонування, що відповідають конкретному службовому призначенню. Модульне проектування передбачає представле-

ння об’єкта на ієрархічному рівні, який описується такими основними конструкціями:

- Технологічна лінія або дільниця.
- Технологічна машина.
- Функціональний модуль (вузол або механізм машини).
- Деталь модуля.
- Модуль поверхонь деталі, об’єднаних за функціональною або технологічною ознаками.

Ці конструкції можуть розглядатися як ФМ, оскільки вони реалізують основну функцію відповідного ступеня складності.

За рівнем технологічних завдань можна виділити такі класи модульних технологічних машин.

Модульні технологічні машини першого класу, які забезпечують виконання однотипних технологічних операцій для виробів з різними параметричними характеристиками. До складу таких машин входить однаковий набір ФМ з високою універсальністю, які задаються базовою структурою машини, або система взаємозамінних ФМ.

Модульні технологічні машини другого класу дозволяють створювати обладнання для комплексного виготовлення виробів одного типу, що розрізняються не тільки розмірами, формою, фізико-механічними характеристиками, але і структурою. В цьому випадку до складу машини входять додаткові ФМ, які розширюють їх універсальність.

Модульні технологічні машини третього класу призначені для реалізації складних технологічних операцій, що базуються на різних технологічних методах.

Машини третього класу мають таку важливу характеристику, як гнучкість, що дозволяє їх легко переналагоджувати і з успіхом застосовувати в сезонному виробництві.

Узагальнюючи особливості функціонально-модульного проектування машинного обладнання, можна відзначити такі переваги:

- спрощується налагодження машини, оскільки функціональна незалежність ФМ виключає вплив помилок в інших, зв’язаних з ним модулях на його функціонування;
- забезпечується можливість організації спільної роботи багатьох розробників, оскільки кожен проектувальник має справу із незалежним від інших ФМ;

• підвищується якість проектування, оскільки відносно невелика складність окремих ФМ дозволяє здійснити більш точний аналіз і перевірку конструкції;

• опис технологічних машин чи ліній має більшу структурну визначеність, оскільки дані розподілені між структурними елементами;

• скорочується обсяг специфікації технічного завдання завдяки включенню в опис ієрархії структурних елементів і відношення між атрибутами об'єктів різних рівнів ієрархії.

Застосування модульного принципу дозволяє здійснювати замінність, кодифікацію, видалення і доповнення складових частин машини [37].

1.3. Принципи автоматизованого проектування функціонально-модульних технологічних машин

Сучасні умови виробництва вимагають підвищення якості проектованого пакувального обладнання, що призводить до ускладнення його конструкції і, як наслідок, збільшення об'єму проектних робіт. З іншого боку, зниження фінансування цих робіт робить необхідним скорочення тривалості і зменшення трудомісткості процесу проектування [67]. Це зумовлює необхідність у застосуванні систем автоматизованого проектування (САПР), які б дозволяли підвищувати ефективність робіт, пов'язаних із проектуванням ТМ.

Формування САПР в загальному випадку починається з аналізу процесу проектування і формування технічного завдання на САПР. Цей процес розвивається в трьох паралельних напрямках:

– формування організаційної системи – об'єму проектних робіт і способів їх виконання;

– формування інформаційного середовища – сукупності всіх видів і форм інформації;

– вибір або розробка комплексу необхідних технічних засобів (програмного забезпечення) [32].

Для розробки САПР компонувань машин процес проектування потрібно ділити на такі етапи:

– аналіз переліку технологічних переходів у складі технологічної операції, вказаних в технічному завданні на проектування;

– аналіз можливостей і необхідності поєднання технологічних переходів;

– аналіз можливих варіантів компонувань, що забезпечують виконання технологічної операції;

– вибір оптимального варіанту структури;

– розробка оптимального робочого компонування [9].

Важливим етапом в процесі розробки САПР є побудова моделі процесу проектування. Модель повинна відображати склад типових проектних робіт і зв'язків між ними, встановлювати структуру задач, що вирішуються на різних етапах проектування, визначати джерела і характер інформації, яка використовується в процесі проектування [5, 11, 61].

Наступним важливим етапом є встановлення методів і способів проектування, на основі яких можна сформулювати завдання і визначити трудомісткість його виконання. Від обраного методу залежать також і алгоритми функціонування технічних засобів. Таким чином, на цьому етапі закладаються основи методичного забезпечення САПР, який повинен передбачати можливість діалогу між проектантом і ЕОМ в процесі проектування [27].

При автоматизації конструкторського проектування завдання конструювання необхідно звести до структурного синтезу. Це, у більшості випадків, найбільш складна та трудомістка частина конструкторського проектування. Вона полягає у добиранні ФМ відповідно до заданої функціональної схеми ТМ, що при значній кількості можливих варіантів компонувань зумовлює необхідність в автоматизації процесу їх синтезу, аналізу і обґрунтованого вибору.

Отже, головне завдання в створенні САПР – це розробка нової технології проектування, яка дозволяла б на ранніх етапах проектування правильно вибрати основні параметри конструкції і оцінити різні характеристики її ефективності, а також впродовж всього процесу проектування контролювати зміну цих характеристик так, щоб в результаті пред'явити до випробувань конструкцію, доцільність якої вже не вимагає доведень [38].

Основними засадами сучасної методики проектування, на основі якої створюється САПР, є застосування системних принципів опису як мети проектування, так і його результату – об'єкта проектування, з однієї сторони, а також можливість застосування сучасних математи-

чних методів для знаходження оптимального варіанта, що є інтелектуальною технологією проектування.

Алгоритмізація процесу синтезу компонування стала можливою тільки після створення систем їх формалізованого опису з різною мірою конкретизації. Існує ряд методів кодування функцій, технічних характеристик і компонувань машин [3, 20, 60, 79].

Зокрема в [3] запропоновано описувати компонування з допомогою структурних формул, побудованих згідно принципів алгебри логіки і теорії множин, що відображають структуру машини та розміщення ФМ в координатному просторі.

Графічний метод опису і синтезу компонувань машини, наведений в [20, 79] полягає в побудові моделей її структури у вигляді принципово-структурних схем, що описують не лише склад та просторове розташування ФМ, а й зв'язки між ФМ та траєкторію переміщення рухомих ФМ, що надає більш повну інформацію про ТМ порівняно зі структурними формулами.

У роботі [66] описані чотири різні типи кодування – координатний, елементний, блоковий і конструктивний, що відповідають різним етапам проектування. Запропонована система кодування дозволяє повно, однозначно і з різною мірою конкретизації описувати компонування. Проте, система (особливо її конструктивний код) є надто детальною для ранніх етапів проектування і більшою мірою призначена для використання на стадії технічного проекту.

Можливість проектування компонувань із застосуванням ЕОМ показані в роботах [2, 15, 22]. Кожне компонування аналізується по ряду параметрів для вибору варіанту, який найбільшою мірою задовольняє умовам виробництва, з допомогою ряду спеціально розроблених програм.

САПР, які найчастіше використовуються для проектування ТМ, є CAD-системи, призначені для створення 3-вимірних віртуальних моделей машини та її типових функціональних пристроїв у графічному середовищі відповідних програм. Для цього використовуються три типи даних про ТМ: множина віртуальних моделей ФМ, множина ознак чи характеристик ТМ (геометричні, фізичні, технічні, техніко-економічні), множина відношень між ФМ та ознаками чи характеристиками ТМ. Визначальним для якості майбутньої машини завданням є розробка системи правил для об'єднання електронних моделей ФМ

в загальну модель машини, які б враховували можливість оцінки отриманого варіанту компонування за відповідними критеріями оптимальності для порівняння його з іншими можливими і вибору кращого [36, 37].

Відповідно з напрямом абстрагування і принципами модульного проектування розробники можуть йти такими шляхами – від електронних макетів машин і ліній “вниз” − до складальних одиниць і окремих деталей, або від окремих деталей “вверх” − до складальних одиниць, машин і ліній (рис. 1.2).

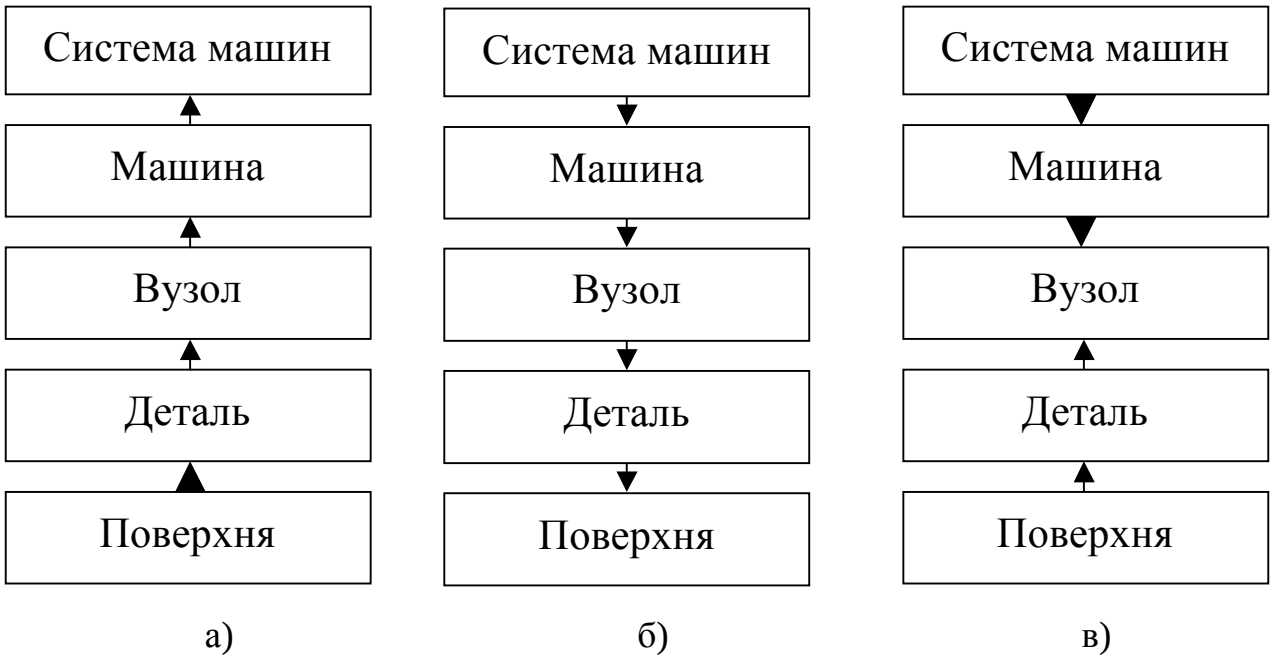


Рис. 1.2. Методи віртуального проектування із напрямом створення електронних моделей: “знизу − вверх” (а), “зверху − вниз” (б), “зустрічний” (в)

При проектуванні “знизу − вверх” можна привести будь-яку послідовність функціональних модулів до одного функціонального модуля (рис. 1.2, а).

При використанні методу “зверху − вниз” (рис. 1.2, б) виходять з електронного макета технологічної лінії, що має необхідні характеристики, і послідовно опрацьовують шари віртуальної системи аж до окремих деталей технологічних машин цієї лінії. В цьому випадку проектування здійснюється у такій послідовності – визначення рівня абстракції опису компонентів лінії вищого рівня, потім проводиться аналіз їх визначеності для розв’язання задачі проектування. Якщо ж

ні, то кожен компонент представляється елементами нижчого рівня, якому відповідає нижчий рівень абстракції.

У то же час зворотна послідовність проектування “зверху − вниз” здійснюється виходячи із єдиного ФМ, який реалізує службову функцію машини, який послідовно розкладається в складну структуру основних елементів нижчого рівня.

При використанні функціонально-модульного принципу з’являється третій метод проектування “зустрічний”. Він полягає у проектуванні нових функціональних модулів методом “знизу − вверх”, тобто від моделей деталей до моделей вузлів, а створення нових машин із функціональних модулів – за методом “зверху − вниз”, тобто від макету машини – до її моделі синтезуванням із моделей функціональних модулів (рис. 1.2, в).

Аналіз робіт в області автоматизації проектування ТМ свідчить про те, що автоматизовані, головним чином, креслярські і обчислювальні операції, пов’язані з їх конструюванням. В той же час проблеми вибору найбільш раціональних технологічних і конструкторських рішень компоновки машин із складових елементів, підбір цих елементів залишаються поза межами автоматизованого розв’язання [38]. Це істотно обмежує можливості створення нових конструкцій ТМ на основі синтезу їх компонувань, тому потребує подальшого опрацювання.

Таким чином, є необхідним створення системи програмних процедур в САПР ТМ, які б дозволили конструктору на основі обмеженої інформації про ТМ виконати завдання синтезу, моделювання, аналізу, оцінки, оптимізації і відбору альтернатив.

1.4. Постановка проблеми оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури машин для пакування сипких речовин

Сучасний стан виробництва вимагає створення високо ефективного пакувального обладнання за мінімальний термін, що неможливо здійснити без автоматизації процесу проектування, яка, в свою чергу, потребує більш строгої формалізації, ніж під час застосування традиційних методів, а також наявності розвиненого методологічного, математичного та програмного забезпечення. Однак автоматизація

проектування спрямована, в основному, на побудову віртуальних моделей ПМ з допомогою спеціальних графічних середовищ – CAD-систем, які не передбачають розв'язування задачі оптимізації об'єкту проектування. З іншого боку, існуючі програми, створені на основі алгоритмів методів розв'язку задач оптимізації, не адаптовані до структурної оптимізації машин для пакування сипких речовин.

Проектування компонування пакувальної машини є найбільш складним і визначальним етапом забезпечення ефективності. Помилки, допущені на цьому етапі проектування, призводять до складних наслідків.

Виходячи із вищевказаного необхідно підвищити ефективність створення та оцінки компонувань машин для пакування сипких речовин на ранніх етапах проектування шляхом розробки автоматизованої підсистеми оптимізаційного синтезу.

Тому оптимізаційний синтез функціонально-модульної структури машин для пакування сипких речовин включає розв'язання таких задач:

– аналіз функціонально-модульної будови машин для пакування сипких речовин та типорозмірів основних ФМ;

− створення системи кодування, методу формалізованого опису структури та моделювання компонувань машин для пакування сипких речовин;

– розробка алгоритмів і програм для розв'язання задач одно- і багатокритеріальної оптимізації структури машин для пакування сипких речовин;

– представлення конструкції машин для пакування сипких речовин, розроблених з використанням методів оптимізаційного синтезу.

РОЗДІЛ 2. Концепція створення нових технологічних машин для пакування сипких речовин

2.1. Технологія пакування сипких речовин

На сучасному етапі розвитку пакувальної галузі пакувальні машини (ПМ) для пакування сипких речовин набувають всебічного розповсюдження. Це зумовлено зростаючим асортиментом пакованої продукції, появою нових пакувальних матеріалів та типів упаковок, що, у свою чергу, викликає необхідність в структурному удосконалені ПМ для адаптації їх під стрімко зростаючі вимоги виробництва.

ПМ даного призначення належать до багатопозиційних технологічних машин послідовної дії. Їх структура формується на основі модульного принципу як методу побудови різних технічних систем з різноманітними характеристиками шляхом компонування їх з типових модулів визначеним чином для створення матеріальних (передача виробів), енергетичних (привод рухомих елементів) та інформаційних (контроль і управління роботою) зв'язків між ними [14, 35].

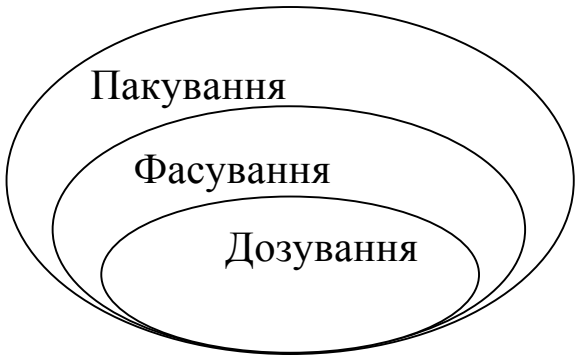


Рис. 2.1. Узагальнена структура операції пакування

Порядок розміщення та кількість цих модулів визначається послідовністю виконання технологічної операції пакування та числом переходів (робочих позицій), з яких вона складається.

В загальному випадку пакування – це підготовка продукції з застосуванням упаковки до транспортування, зберігання, реалізації і споживання [63]. Операція пакування передбачає дозування та фасування продукту (рис. 2.1). ЇЇ специфіка визначає службове призначення ПМ.

Технологічна операція *пакування сипких речовин у споживчу упаковку* – пакет, виготовлений із полімерної плівки, передбачає виконання ряду технологічних (робочих), допоміжних та контрольних переходів (рис. 2.2).

Згідно ДСТУ 2515-94 [64]:

– фасування – уміщення продукту в тару чи пакувальний матеріал з попереднім або одночасним дозуванням продукції;

– дозування – відмірювання потрібної кількості продукції за рахунком, масою чи об’ємом;

Рис. 2.2. Структура технологічної операції пакування сипких речовин

– подача пакувального матеріалу – переміщення стрічок (-чки) рулонних пакувальних матеріалів в зону їх використання;

– формоутворення рукава – утворення заготовки упаковки шляхом протягування плівки через нерухомі формоутворювачі;

– герметизація – закривання тари після вміщення в неї продукції з метою забезпечення її збереження і створення умов для транспортування і реалізації.

Герметизація упаковки із стрічкових полімерних матеріалів здійснюється шляхом термозварювання поздовжнього та поперечного швів пакета.

Зварювання пакувальних матеріалів – це утворення нероз'ємного з'єднання пакувальних матеріалів під дією тепла, при якому частково чи повністю зникає межа розділу зварюваних матеріалів.

2.2. Функціональні пристрої як функціонально-модульна база машини для пакування сипких речовин

Типова структура машини для пакування сипких речовин (рис. 2.3) відповідає структурі технологічної операції пакування та включає в себе функціональні пристрої за ДСТУ 2379-94 [64] (табл. 2.1), систему приводу виконавчих механізмів та систему керування їх роботою. Функціональні пристрої є технічними засобами реалізації технологічних переходів, з яких складається виконувана машиною технологічна операція.

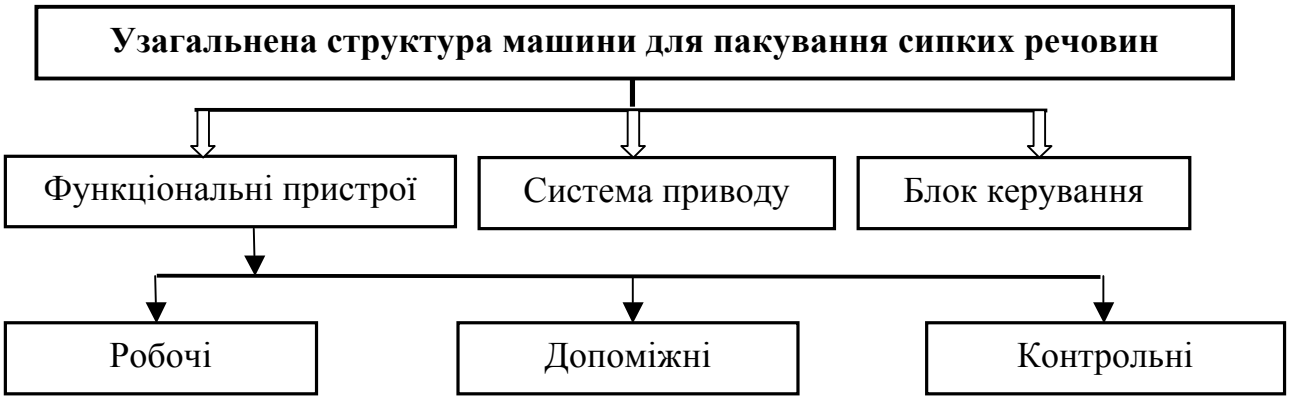


Рис. 2.3. Типова узагальнена структура машини для пакування сипких речовин

Оскільки кожен функціональний пристрій є функціонально самостійною та конструктивно закінченою сукупністю механізмів, що об'єднані спільним функціональним призначенням, то їх слід розуміти як **функціональні модулі (ФМ)** і розглядати ПМ з точки зору її функціонально-модульної будови, яка формується шляхом з'єднання ФМ між собою безпосередньо через стиковочні поверхні або встановленням на рамі чи каркасі через спеціальні перехідні корпусні деталі, що забезпечують їх необхідне положення [30].

Таблиця 2.1

Функціональні пристрої за ДСТУ 2379-94

Назва функціонального пристрою	**Визначення за ДСТУ 2379-94**
Фасувальний пристрій	пристрій для вміщення продукції в тару чи пакувальний матеріал з попереднім або одночасним дозуванням продукції
Дозатор	пристрій для відмірювання певної кількості продукції за рахунком, масою, чи об'ємом
Рулонотримач	пристрій для установлення, фіксування, уповільнення та зупинки руху рулонів пакувальних матеріалів
Пристрої подачі рулонних (стрічкових) пакувальних матеріалів	
стрічкорозмотувач	пристрій для розмотування стрічок (-чки) пакувальних матеріалів з рулонів та подавання їх (її) на подальші операції
стрічкоподавач	пристрій для переміщення стрічок (-чки) рулонних пакувальних матеріалів в зону використання їх (її) під час пакування продукції з поділом стрічок (-чки) на окремі заготовки
стрічкогальмівний пристрій	пристрій для сповільнення та зупинки руху стрічок (-чки) пакувальних матеріалів
стрічко-амортизувальний пристрій	пристрій для зменшення коливань натягу стрічок (-чки) пакувальних матеріалів під час руху шляхом нагромадження запасу цих (цієї) стрічок (-чки) між рулонами та іншими частинами стрічкоподавача
стрічконапрямний пристрій	пристрій для збереження або зміни напрямку руху стрічок (-чки) пакувальних матеріалів і (або) надання стрічкам (-чці) жолобчастого чи іншого профілю

Продовження таблиці 2.1

стрічкорозрізувач	пристрій для поділу стрічок (-чки) пакувальних матеріалів на окремі заготовки
стрічкозаправний автоматичний пристрій	пристрій для безперебійної роботи стрічкоподавача під час закінчення розмотування стрічки запасного рулона в стрічкорозмотувач без участі людини
Рукавоутворювач	пристрій для виготовлення рукава стрічки пакувального матеріалу склеюванням, термосклеюванням чи зварюванням
Зварювальний пристрій	пристрій для утворення нероз'ємного з'єднання пакувальних матеріалів під дією тепла
Обдувний пристрій	пристрій для видалення забруднень з поверхні тари (пакувальних одиниць) дією струменя повітря
Відвідний пристрій	пристрій для переміщення пакувальних одиниць (наповненої продукцією тари) із зони загортання, фасування, закупорення.
Вакуумний захопник	пристрій, що діє на основі різниці тиску атмосферного і в камері вакуумного захвату
Живильник	пристрій подачі продукції до робочих органів пакувального устаткування
Лічильний пристрій	пристрій для підраховування кількості пакувальних одиниць
Контрольно-ваговий пристрій	пристрій для перевірки заданої маси продукції, вміщеної в тару
Пристрій для центрування малюнка (напису)	пристрій для надання малюнку (напису), нанесеному на пакувальний матеріал, заданого положення відносно продукції, що пакується

ФМ поділяють за функціональною ознакою на три види:

1 – технологічні (робочі), які виконують окремі технологічні переходи – безпосередньо контактують з виробом, змінюючи його форму, розміри, фізико-механічні властивості та структуру;

2 – допоміжні, які виконують транспортно-накопичувальні і допоміжні переходи, що є необхідними для неперервності процесу виготовлення виробу, не змінюючи при цьому його характеристик;

3 – контрольні, що виконують контрольно-вимірювальні переходи [37].

2.3. Аналіз компонувальних схем функціонально-модульної структури машин

Усі типові ФМ машин для пакування сипких речовин можна об’єднати у групи за функціональною ознакою. Такий підхід передбачає групування (об’єднання) ФМ в блоки функціональних модулів (БФМ). Основною його перевагою є можливість більш ретельного аналізу і моделювання пакувальних машин.

Більшість машин для пакування сипких речовин має у своєму складі дозувально-фасувальний блок функціональних модулів − БФМ-1, пакувальний блок функціональних модулів − БФМ-2 та додатковий блок функціональних модулів − БФМ-3 (рис. 2.4).

Ієрархічну структуру машини зручно представити у вигляді графа, який являє собою “І-АБО”-дерево (рис. 2.5).

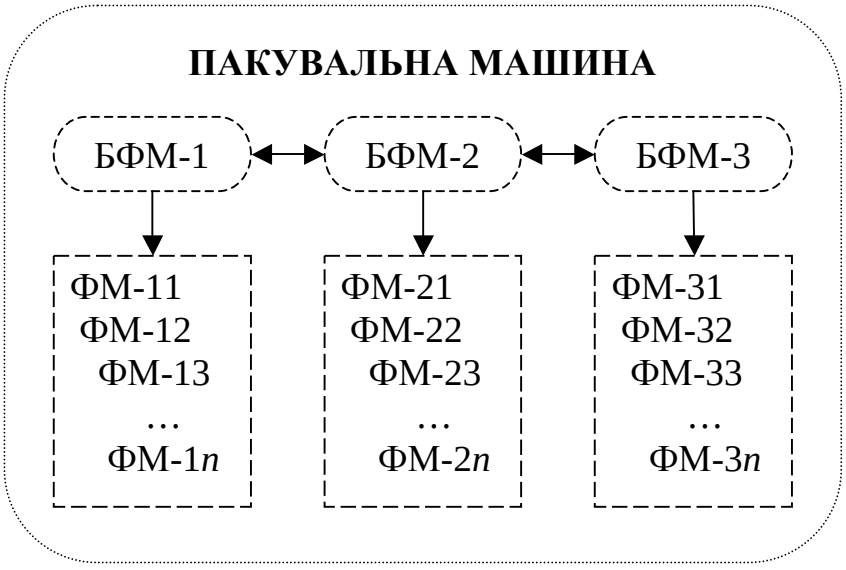


Рис. 2.4. Ієрархічне представлення структури пакувальної машини

Дана модель відображає функціонально-модульну будову машин для пакування сипких речовин, а також можливість поєднання різних типорозмірів ФМ між собою.

Застосування ієрархічного опису структури ПМ дає змогу більш глибоко проаналізувати характер зміни її компонувань як на рівні БФМ, так і на рівні цілої машини [74].

Машини для пакування сипких речовин характеризуються широкою різноманітністю компонувань (рис. 2.6) та розрізняються за наступними основними ознаками:

• *за характером міжпозиційного переміщення виробу*:

1 – дискретне (виріб між робочими позиціями переміщується на крок, технологічні переходи здійснюються під час зупинки руху виробу) (рис. 2.8 – 2.10, 2.17);

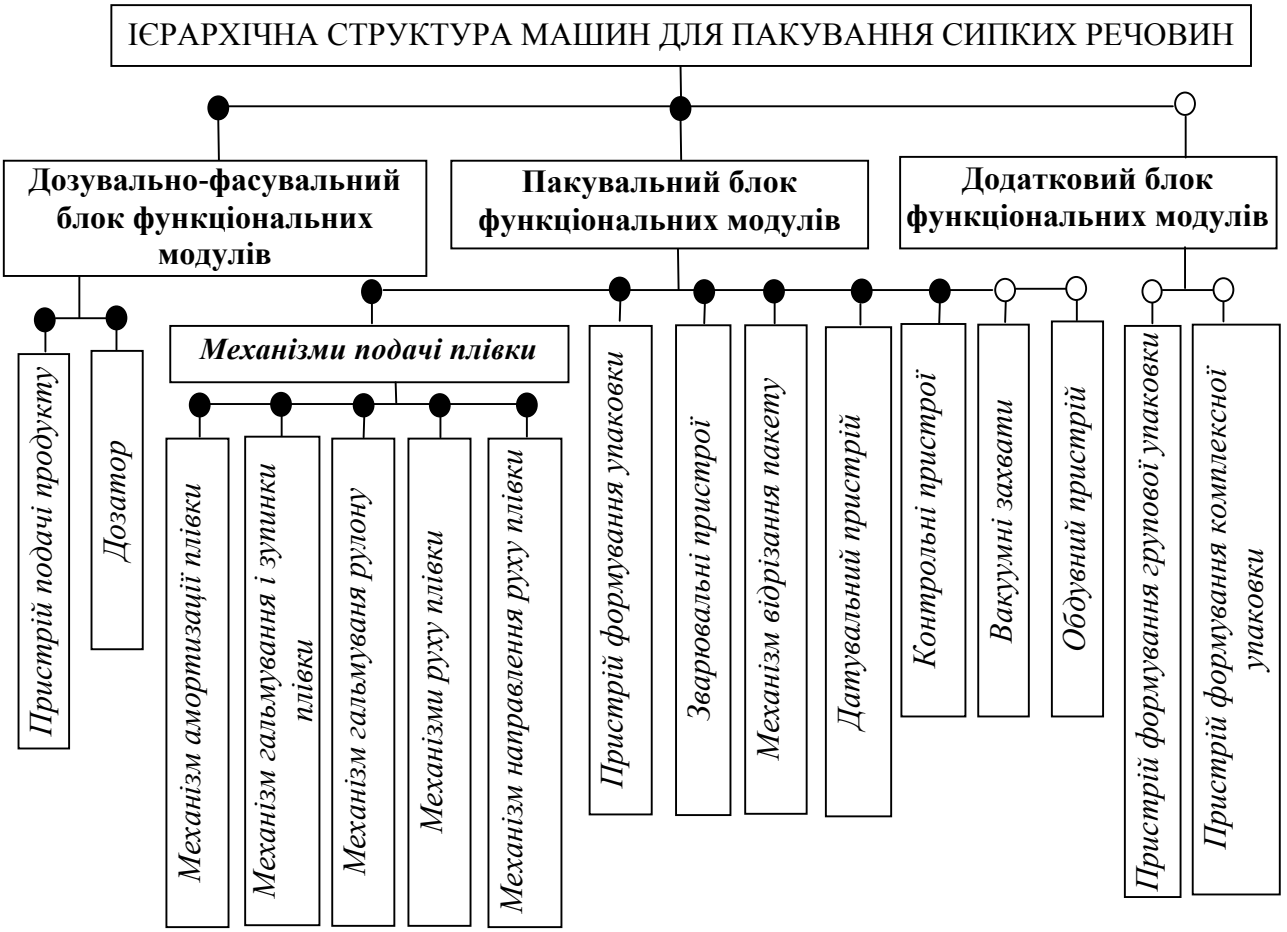


Рис. 2.5. Узагальнений граф структури машини для пакування сипких речовин:
●— *вершини зв'язані "і"*; o— *вершини зв'язані "або"*

2 – безперервне (виріб проходить через усі позиції без зупинок, технологічні переходи здійснюються без пауз) (рис. 2.6, 2.7, 2.11 – 2.16, 2.18);

• *за розташуванням у просторі*:

1 – вертикальне лінійне (рис. 2.6 − 2.14, 2.16);
2 – горизонтальне лінійне (рис. 2.17);
3 – горизонтальне лінійно-кругове (рис. 2.18);

4 − нахилене (рис. 2.15) [26, 53].

Модифікація компонувань машин реалізується переважно за допомогою методів:

- об’єднання – укрупнення шляхом сполучення між собою механізмів різного призначення;
- розділення – розбиття складного за конструкцією механізму на окремі;
- дублювання − введення до складу машини двох і більше ФМ одного й того ж функціонального призначення;
- інверсія – заміна одного механізму іншим, зміна його просторового розміщення [54].

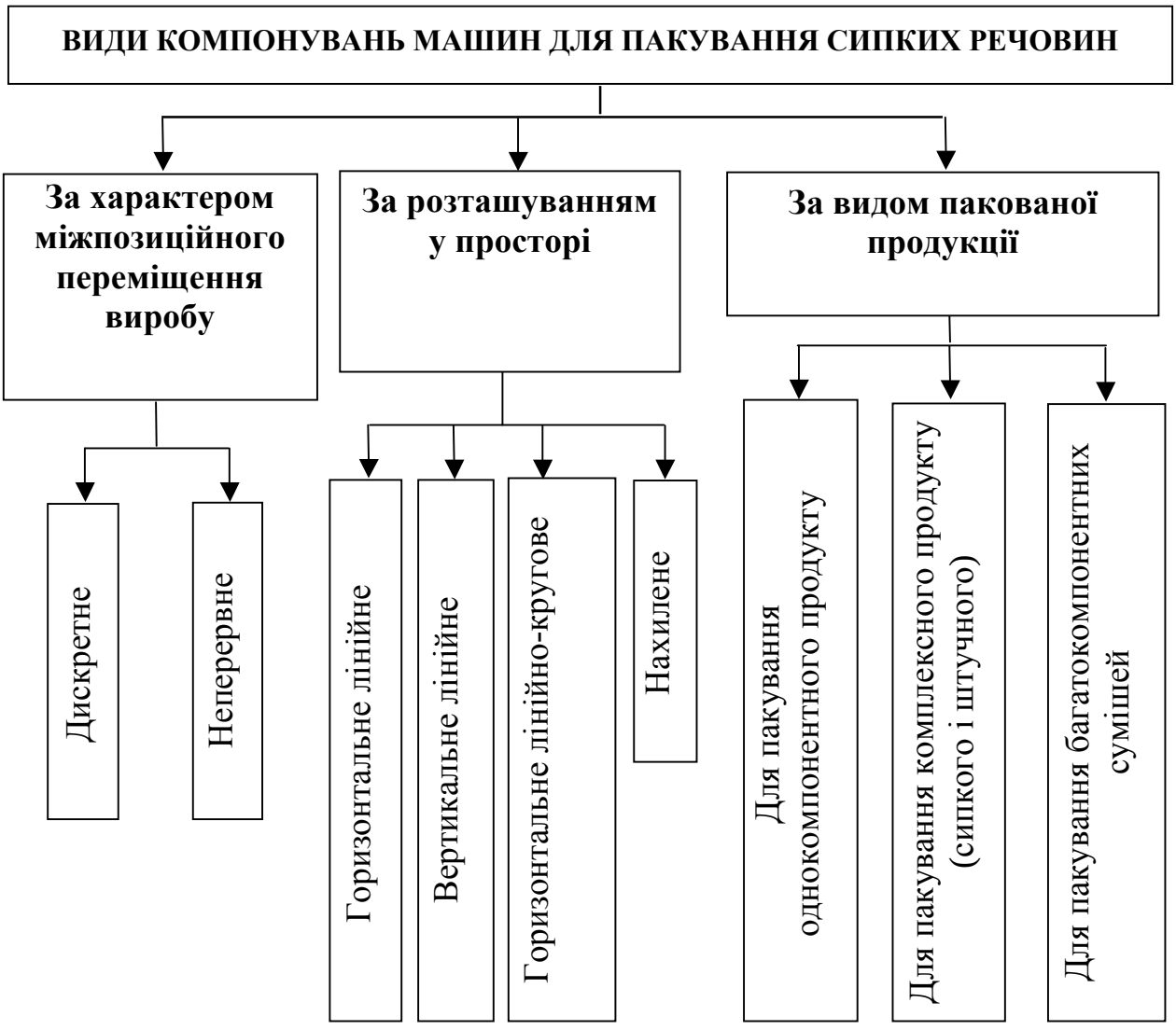


Рис. 2.6. Класифікація компонувань машин для пакування сипких речовин

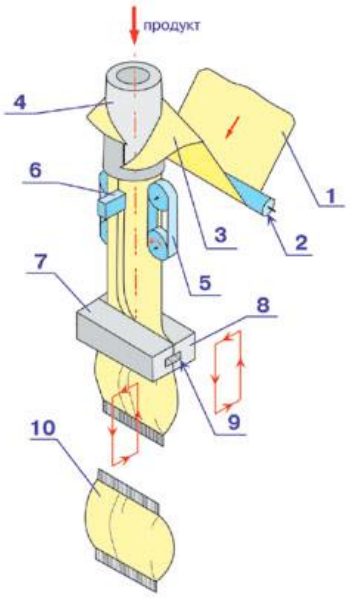


Рис. 2.6. Компонування машини з губками зварювання і протяжки: 1, 3 – плівка; 2 – механізм натягу плівки; 4 – рукавоутворювач; 5 – механізм протягування плівки; 6 – губка поздовжнього зварювання; 7,8 – губки поперечного зварювання; 9 – відрізний механізм; 10 – готовий пакет

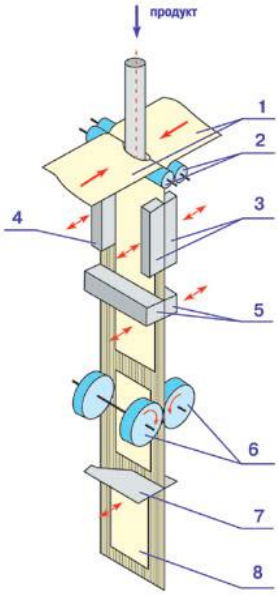


Рис. 2.7. Компонування машини з губками зварювання і роликами протяжки: 1 – плівка; 2 – направляючі валки; 3, 4 – губки поздовжнього зварювання; 5 – губки поперечного зварювання; 6 – ролики протяжки; 7 – відрізний ніж; 8 – готовий пакет

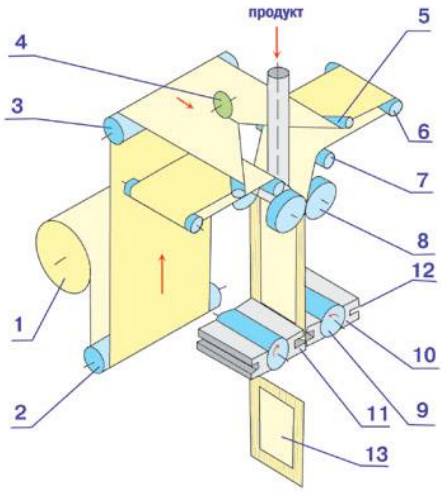


Рис. 2.8. Компонування машини з роторними губками зварювання: 1 – рулон плівки; 2, 3, 5, 6, 7 – натяжні ролики; 4 – розрізний ніж; 8 – ролики поздовжнього зварювання; 9 – ротор; 10, 12 – губки поперечного зварювання; 11 – відрізний механізм; 13 – готовий пакет

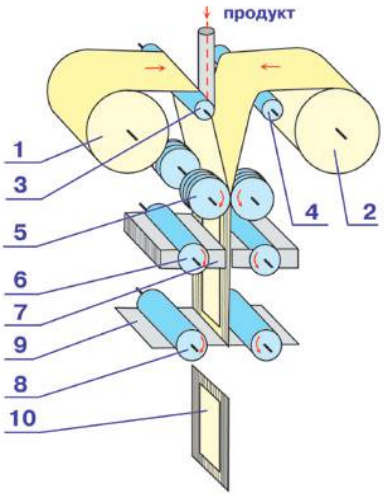


Рис. 2.9. Компонування машини з роторними губками зварювання і механізмами відрізання: 1, 2 – рулони плівки; 3, 4 – направляючі валки; 5 – ролики поздовжнього зварювання; 6, 8 – ротор; 7 – губки поперечного зварювання; 9 – відрязний ніж; 10 – готовий пакет

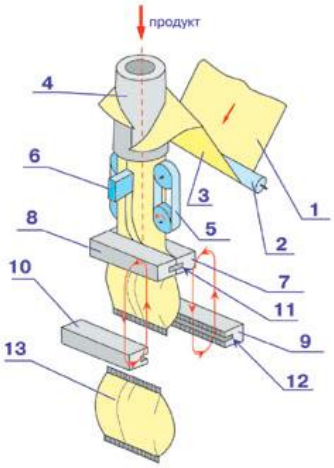


Рис. 2.10. Компонування машини з парними губками зварювання: 1, 3 – плівка; 2 – механізм натягу плівки; 4 – рукавоутворювач; 5 – механізм протягування плівки; 6 – губка поздовжнього зварювання; 7, 8, 9, 10 – губки поперечного зварювання; 11, 12 – відрізний механізм; 13 – готовий пакет

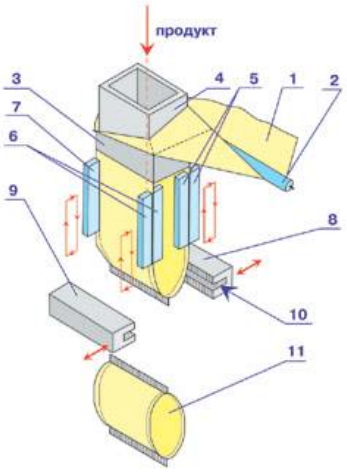


Рис. 2.11 Компонування машини з губками зварювання бокових швів: 1 – плівка; 2 – механізм натягу плівки; 3 – формувальний ворот; 4 – рукавоутворювач; 5, 6, 7 – губки зварювання бічних швів; 8, 9, 10 – губки поперечного зварювання; 10 – відрізний механізм; 11 – готовий пакет

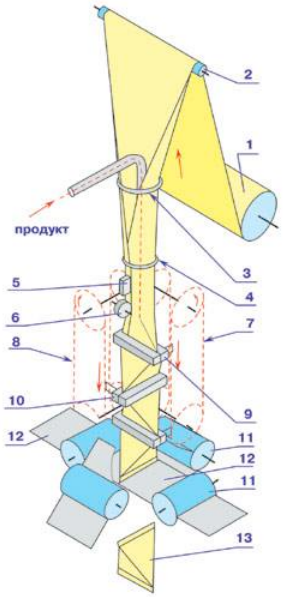


Рис. 2.12. Компонування машини з системою механізмів зварювання і відрізання: 1 – рулон плівки; 2 – натяжний механізм; 3, 4 – формуючий механізм; 5 – механізм поздовжнього зварювання; 9, 10 – губки поперечного зварювання; 11 – ротор; 12 – відрізний механізм; 13 – готовий пакет

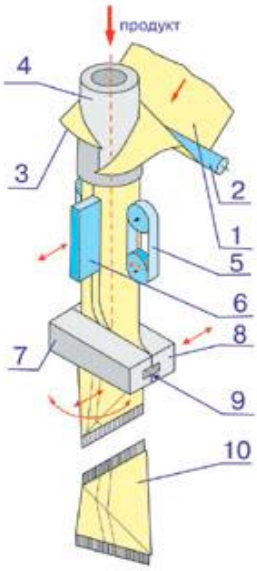


Рис. 2.13. Компонування машини з поворотними зварними губками: 1 – рулон плівки; 2 – натяжний механізм; 3 – формуючий механізм; 4 – рукавоутворювач; 5 – механізм протягування плівки; 6 – механізм поздовжнього зварювання; 7, 8 – губки поперечного зварювання; 9 – відрізний ніж; 10 – готовий пакет

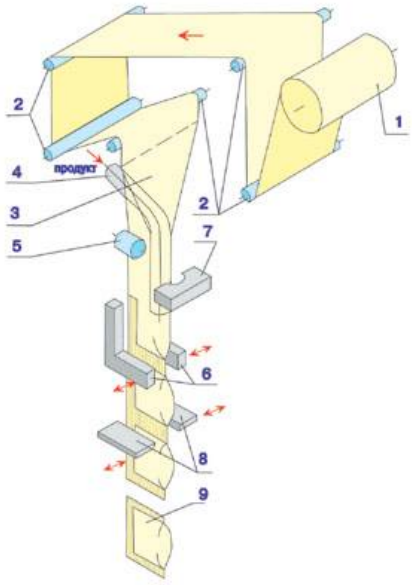


Рис. 2.14. Компонування машини L-подібними зварними губками: 1 – рулон плівки; 2 – направляючі валки; 3 – плівка; 4 – рукавоутворювач; 5 – механізм протягування плівки; 6 – губки поперечного зварювання; 8 – відрязні ножі; 9 – готовий пакет

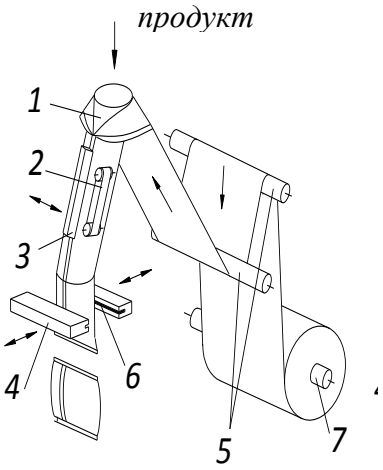


Рис. 2.15. Компонування машини нахиленого типу: 1 – рукавоутворювач; 2 – механізм протяжки; 3 – механізм поздовжнього зварювання; 4 – механізм поперечного зварювання; 5 – механізм подачі плівки; 6 – механізм відрізання; 7 – рулонотримач

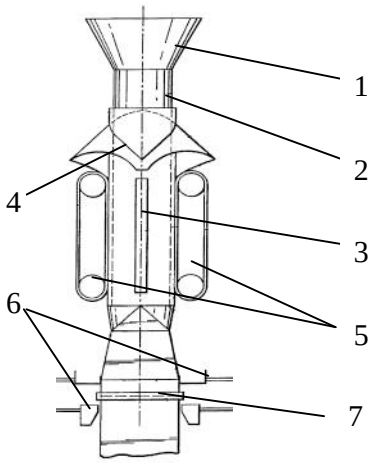


Рис. 2.16. Компонування машини з механізмом формування внутрішніх складок пакету: 1 – приймальна воронка; 2 – рукавоутворювач; 3 – губка поздовжнього зварювання; 4 – формувальний ворот; 5 – механізм протягування плівки; 6 – механізм формування складки; 7 – губки поперечного зварювання

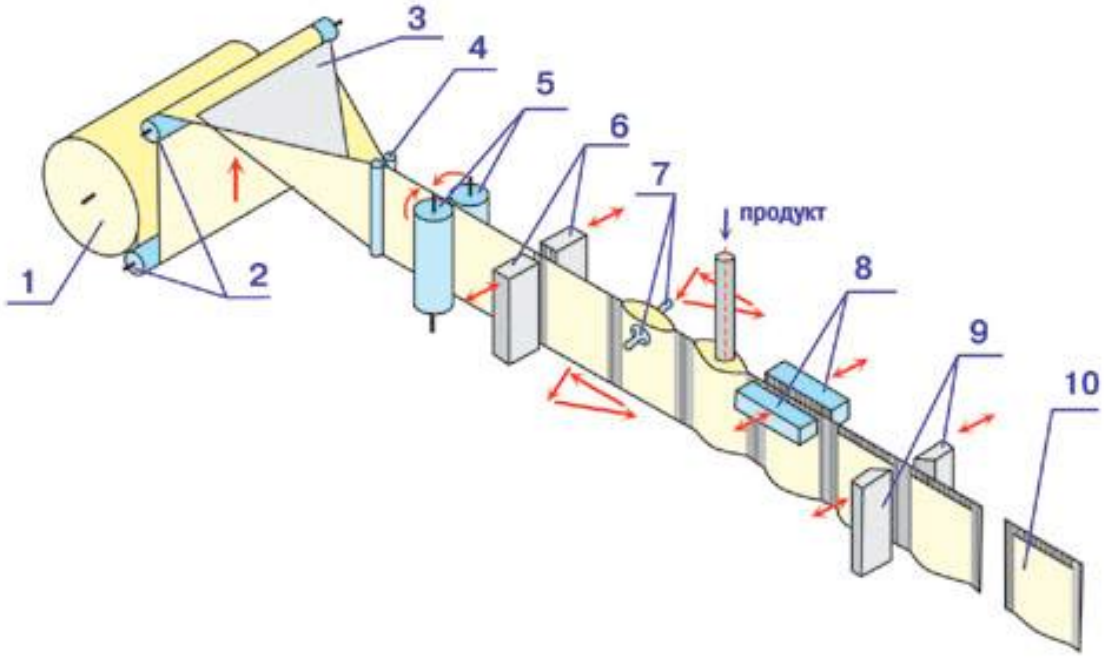


Рис. 2.17. Горизонтальне лінійне компонування машини:
1 – рулон плівки; 2 – натяжні валки; 3 – направляюча; 4 – формуючі валки; 5 – ролики протяжки; 6 – пристрій зварювання бокових швів; 7 − вакуумні захвати; 8 – пристрій зварювання верхнього шва; 9 – механізм відрізання; 10 − готовий пакет

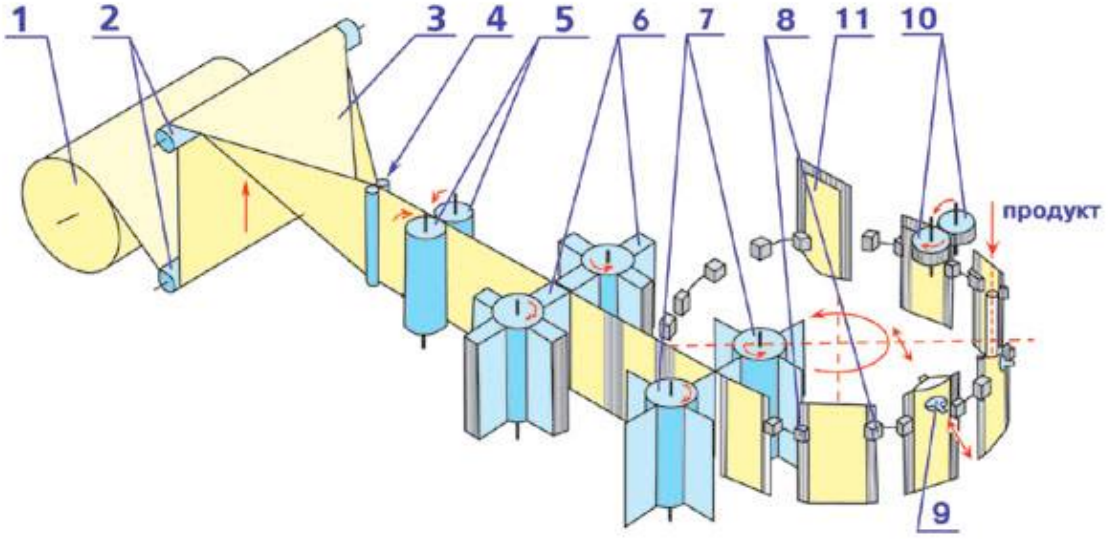


Рис. 2.18. Горизонтальне лінійно-кругове компонування машини:
1 – рулон плівки; 2 – натяжні валки; 3 – направляюча; 4 – формуючі валки; 5 – ролики протяжки; 6 − роторні зварні губки для формування бокових швів пакета; 7 − роторний відрізний механізм; 8 − механічні захвати; 9 − вакуумні захвати; 10 − ролики зварювання верхнього шва; 11 − готовий пакет

Найбільш поширеною особливістю будови машин для пакування сипких речовин з точки зору результатів застосування *методу об'єднання* є поєднання зварювальних пристроїв з іншими механізмами в одному ФМ.

Зокрема, в механізм поперечного зварювання може бути вмонтований ніж, що відрізає пакет вздовж поперечних зварних швів пакета під час змикання зварних губок [92, 93] (рис. 2.6, 2.8, 2.10, 2.11, 2.13), а також термодатувальний пристрій, який витискає дату на зварному шві одночасно із його утворенням [57].

Крім того, зварювальний механізм може здійснювати протягування плівки під час утворення зварних швів – у разі забезпечення можливості його руху вздовж напрямку переміщення рукава, причому протягування можуть виконувати як поперечні зварні губки шляхом опускання на крок, рівний довжині пакета (рис. 2.6, 2.10, 2.11), так і ролик (ролики) поздовжнього зварювання (рис. 2.8).

Має місце також і сполучення механізмів поперечного та поздовжнього зварювання у вигляді суцільної зварної губки відповідної конфігурації (рис. 2.14) [53, 57].

Методом розділення змінено систему приводу машини: якщо ФМ перших пакувальних машини приводились в рух від одного двигуна за допомогою кінематичних зв'язків [39], то на сучасному

етапі практично кожен механізм приводиться в дію від окремого двигуна [65, 85, 90] або пневмоциліндра [65].

Однак попри те, що наведені технічні рішення є достатньо ефективними, застосовувати вказані методи необхідно надзвичайно обережно, оскільки поєднання та розділення функцій для виконання одним чи декількома ФМ відповідно дає величезний ефект лише там, де це логічно витікає із структурних особливостей і призначення проектованої машини, а переслідування ідеї поєднання функцій за принципом аби вилучити зі структури “зайві” елементи нерідко дає негативний результат – нераціональні конструкції [4].

Тому поруч із застосуванням зазначених методів все більшого поширення набувають інші напрями структурного вдосконалення машин. Одним із таких методів є *дублювання*. Прикладами реалізації цього методу є:

- використання двох пар поперечних зварних губок, що забезпечує перехід від машин дискретної дії до машин неперервної дії та підвищує продуктивність внаслідок скорочення тривалості процесу утворення зварних швів за рахунок спрацьовування їх почергово (рис. 2.10) [53];
- створення складної упаковки шляхом вкладання однієї упаковки малого розміру в основну одночасно із фасуванням в останню сипкого продукту (рис. 2.22) [48];
- створення секційної упаковки для фасування різних складових пакованого продукту без змішування за рахунок встановлення в машині двох (або більше) паралельно розташованих на певній відстані один від одного рукавоутворювачів для формування одного рукава і відокремлення його на окремі секції механізмом поздовжнього зварювання (рис. 2.19);
- об’єднання в машині однотипних ФМ, які працюють синхронно, для пакування сипких речовин в кілька пакетів одночасно (рис. 2.20) [26];
- роздільне дозування різних видів сипких речовин різними дозаторами з подальшим фасуванням відміряних доз на транспортер та пакуванням багатокомпонентної суміші в одну упаковку [51].

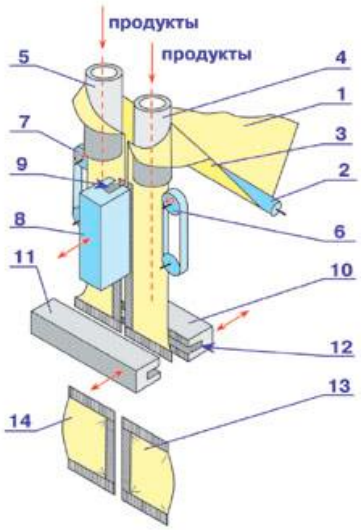


Рис. 2.19. Компонування машини зі зпареними рукавоутворювачами: 1, 3 – плівка; 2 − механізм натягу плівки; 4, 5 − рукавоутворювачі; 6,7 − механізми протягування плівки; 8 − губка поздовжнього зварювання; 9, 12 − відрізний механізм; 10 − губки поперечного зварювання; 13, 14– готовий пакет

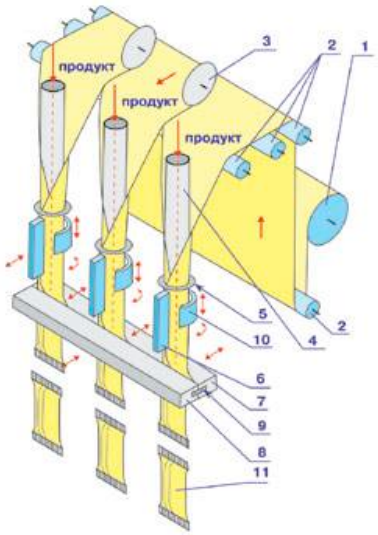


Рис. 2.20. Багатопотокове компонування машини: 1 – плівка; 2 − направляючі валки; 3 − механізм розрізання плівки на смуги; 4 − рукавоутворювач; 5 − фіксатори; 6 − губки поздовжнього зварювання; 7, 8 − губки поперечного зварювання; 9 − відрізний ніж; 10 − механізм протягування; 11 − готовий пакет

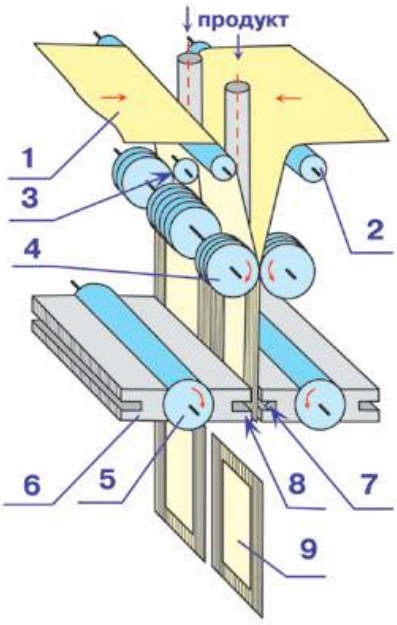


Рис. 2.21. Компонування машини для пакування сипких речовин з губками зварювання і протяжки: 1 − плівка; 2 − ролики; 3 − ножі поздовжнього розрізання; 4 − ролики поздовжньої зварювання; 5 − ротори поперечної розрізання; 6 − губки поперечного зварювання; 7, 8 − відрізні ножі; 9 - готовий пакет

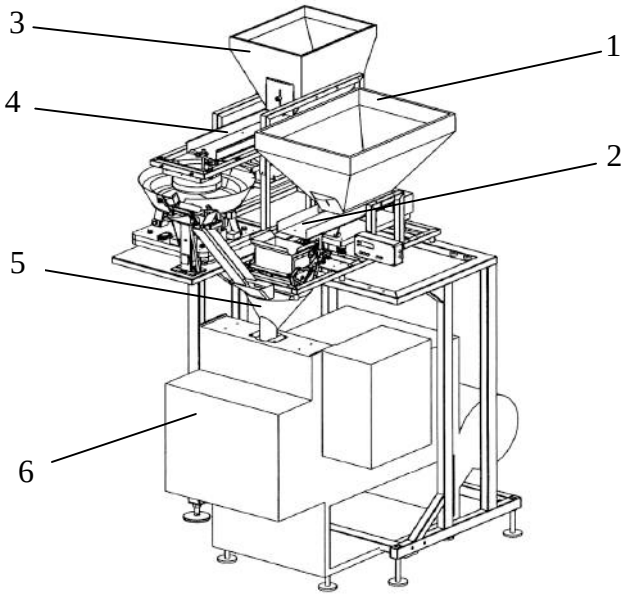


Рис. 2.22. Машина для виготовлення комбінованої упаковки: 1 − бункер для сипкого продукту; 2 − дозатор; 3 − бункер для штучних виробів; 4 − лоток подачі штучних виробів; 5 − приймальна воронка; 6 − пакувальний блок

Ще одним відомим інженерним прийомом є *резервування* [16]. Він подібний до дублювання, однак відрізняється особливістю конструкції ФМ, яка полягає в наявності двох і більше однотипних елементів певного призначення, що виконують технологічний перехід почергово, або спрацьовують при відмові іншого (рис. 2.8 − 2.10). З цієї точки зору резервування буває двох видів:

- внутрішнє − резервна структура функціонує разом із основною;
- зовнішнє − введення додаткової зовнішньої структури, що заміщає елементи, які відмовили [26].

Наступний підхід полягає в ускладненні основного складу машини за рахунок *введення додаткових ФМ* для подальшої обробки готових споживчих упаковок. До таких ФМ, зокрема, належать:

- пристрій кріплення пакетів до стрічки (рис. 2.23, *а*), який дозволяє утворювати групову упаковку із визначеною в ній кількістю виробів. Він включає в себе вузол розмотування стрічки, що складається із двох направляючих роликів і двох регульованих блоком керування гальмівних елементів, та вузол кріплення пакетів до стрічки, суміщений із механізмом поперечного зварювання [50];
- пристрій для формування комплексної упаковки, а саме вкладання пакетів в картонну пачку, оснащений бічними вертикальними пластинами, що стискає готовий пакет з двох сторін до розміру, який дозволяє помістити його в картонну пачку та підгиначами, що закривають клапани пачки після вкладання в неї пакету (рис. 2.23, *б*) [82, 86].

2.4. Аналіз розвитку функціонально-модульної бази машин для пакування сипких речовин

На сучасному ринку існує велика кількість як виробників пакувального обладнання, так і широкий асортимент різноманітних технологічних машин. З метою визначити, який тип компонування ПМ в межах певного функціонального призначення переважає, проведено дослідження, в ході якого розглядався функціонально-модульний склад автоматів для пакування сипких продуктів різних виробників (табл. 2.2). Кожен із них має власну продуктивність, вартість, дизайн, ступінь автоматизації та точність здійснення технологічного процесу, однак їх спільною особливістю є типова конструкція та принцип дії.

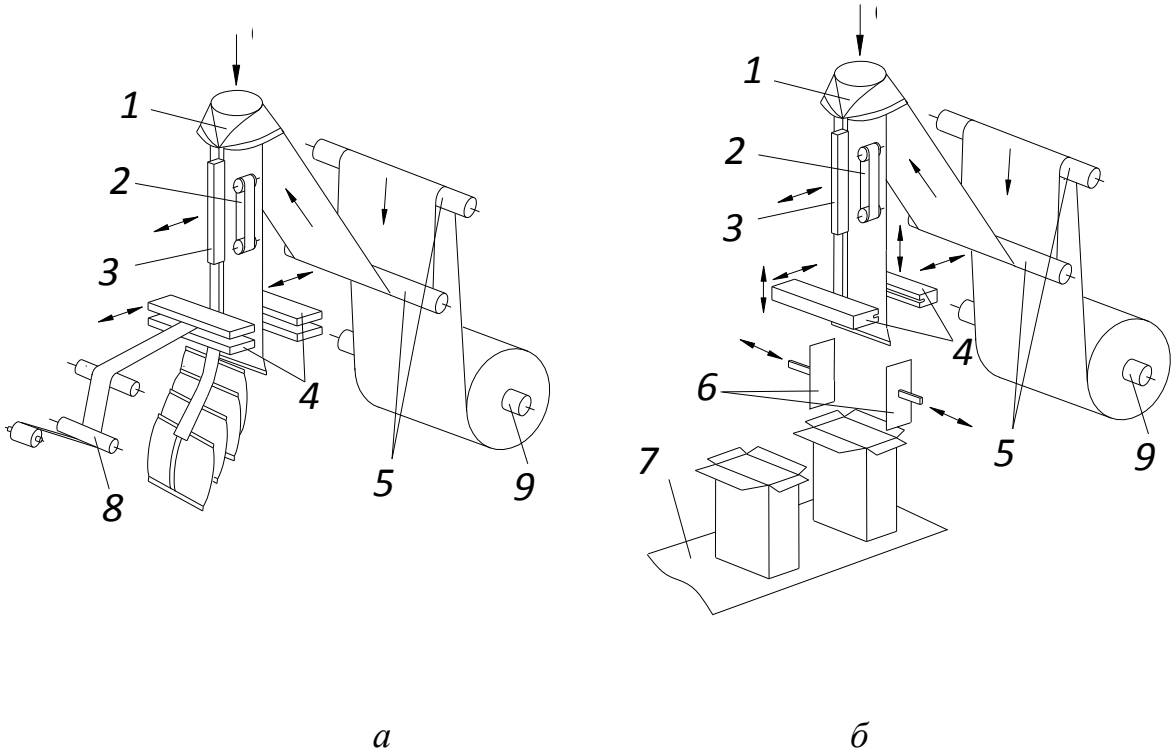
Таблиця 2.2

Статистичний аналіз функціонально-модульного складу автоматів для пакування сипких продуктів

Назва виробника	Функціональний модуль																
	Дозатор				Мезанізм поперечного зварювання			Механізм протяжки			Рукавоут-ворювач			Датчик фотомітки	Механізм формування плоского дна	Бункер із вібросистемою	Механізм наповнення інертним газом
	Ваговий	Об'ємний	Комбінаційний	Шнековий	З механізмом протяжки	З механізмом відрізання	З вмонтованим дататором	Натяжні ремені	Протяжні ролики	Пневмо-протяжка	Один вертикальний	Один нахилений	Кілька вертикальних				
Баленко	+	+								+	+			+			
Рупас-пак	+		+		+	+	+	+	+		+				+		
Лідія	+	+				+	+	+			+						
Током	+					+	+		+		+				+		+
Агросервіс		+				+	+	+			+			+			
Русская Трапеза	+	+	+			+	+	+			+	+		+	+		+
Сигнал-ПАК	+		+		+	+	+	+			+	+		+	+	+	+
ЕлоПак	+				+	+	+	+			+		+	+			
Інтермаш	+	+			+		+				+		+			+	
ТЕРМОПАК	+		+				+	+	+		+			+	+		
ОМАГ		+		+	+	+	+				+		+	+			

Будь-який автомат для запаковування сипких речовин, складається із набору ФМ, необхідних для забезпечення виконання технологічної операції пакування. Відсутність хоча б одного із них допустиме лише у тому випадку, коли його функцію виконує інший ФМ. Конструктивно це реалізується об’єднанням двох і більше механізмів в один: вмонтовуванням термодататора чи термоножів у губки зварювання, або наданням руху механізму поперечного зварювання вздовж напрямку руху рукава для можливості його протягування. Крім того, мають місце і такі відмінності, як наприклад, різні типи дозаторів, механізмів протягування рукава, зварних губок.

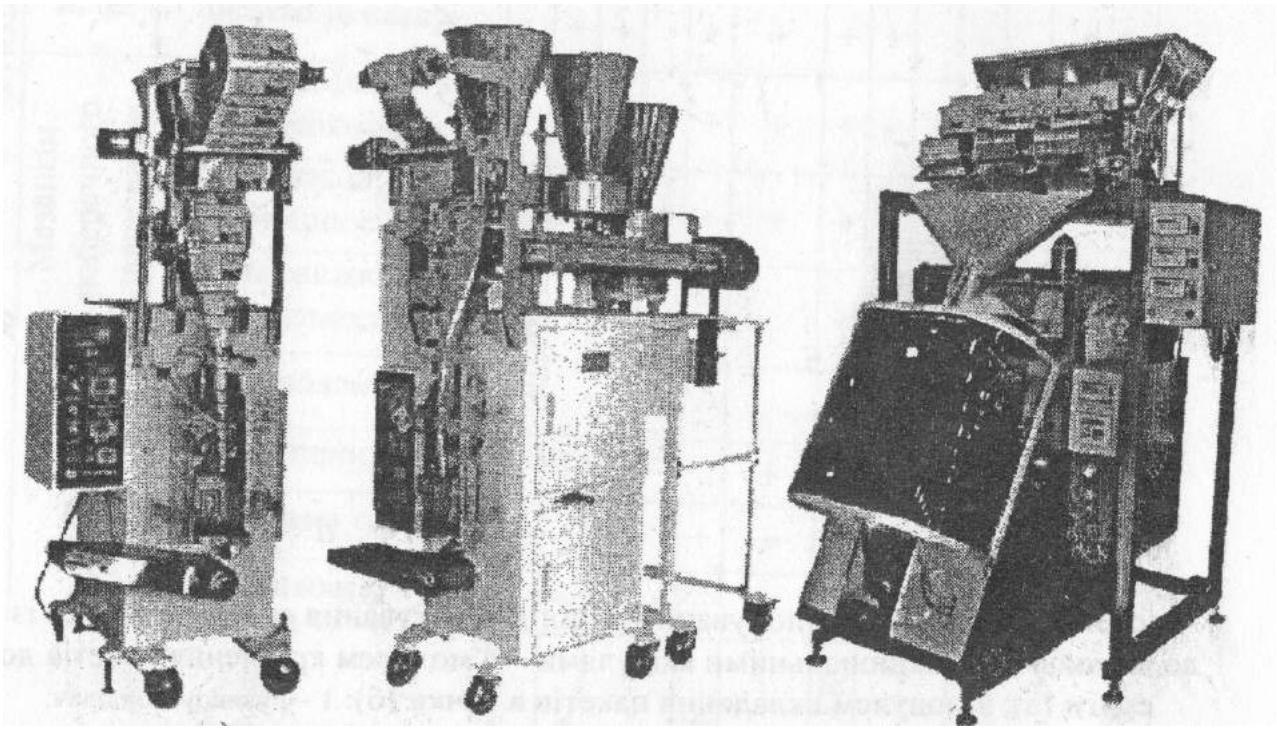
Для більш детального аналізу варіацій структури машин для пакування сипких речовин, розглянемо будову і типорозміри ФМ кожного блоку окремо [18, 68].



а *б*

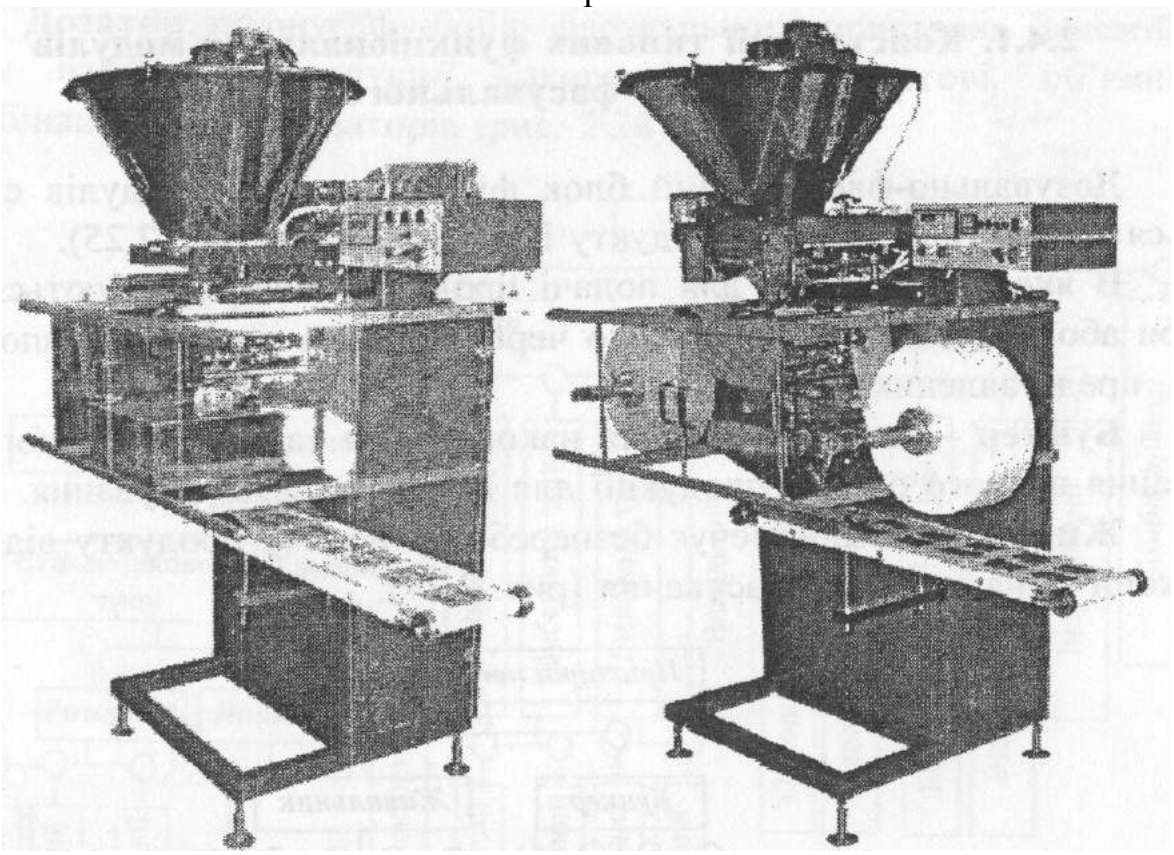
Рис. 2.23. Приклади компонувань машин для пакування сипких речовин із додатковими функціональними модулями − з модулем кріплення пакетів до смуги (а); з модулем вкладання пакетів в пачки (б): 1 – рукавоутворювач; 2 – механізм протяжки; 3 – губка поздовжнього зварювання; 4 – механізм поперечного варювання; 5 – подаючі валки; 6 – затискні пластини; 7 – транспортер; 8 – механізм подачі стрічки, 9 – рулонотримач

а) б) в)



г) д) е)

Рис. 2.24. Машини для пакування сипких речовин вертикального (а-д) та похилого (е) типу



а) б)

в)

Рис. 2.25. Машини для пакування сипких речовин горизонтального типу

2.4.1. Конструкції типових функціональних модулів дозувального-фасувального блоку

Дозувально-фасувальний блок функціональних модулів складається із пристрою подачі продукту і дозатора (див. рис. 2.5).

В якості пристроїв для подачі продукту використовуються бункери або живильники, які у свою чергу бувають декількох типорозмірів, представлених на рис. 2.26.

Бункер – це резервуар (ємкість) для накопичення та короткочасного зберігання певного об'єму продукції для її подальшого дозування.

Живильник забезпечує безперебійну подачу продукту від місця накопичення до місця фасування (рис. 2.27).

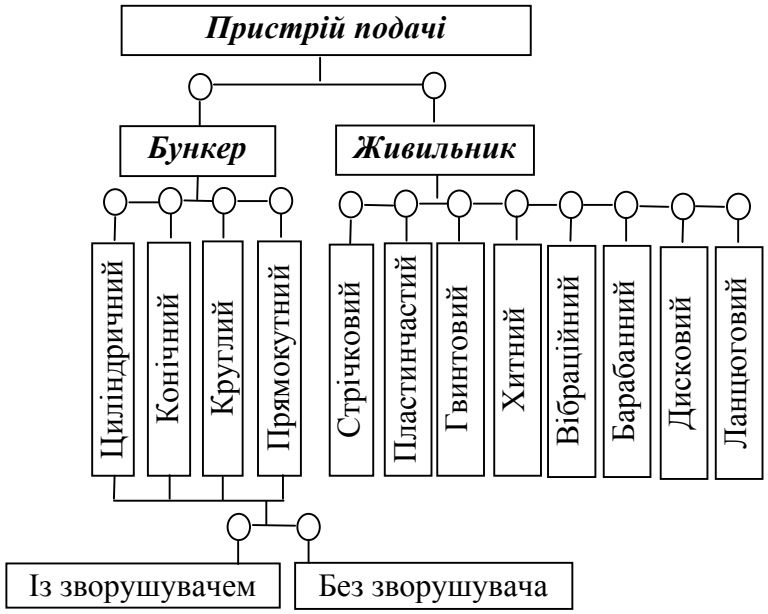


Рис. 2.26. Види пристроїв подачі продукту

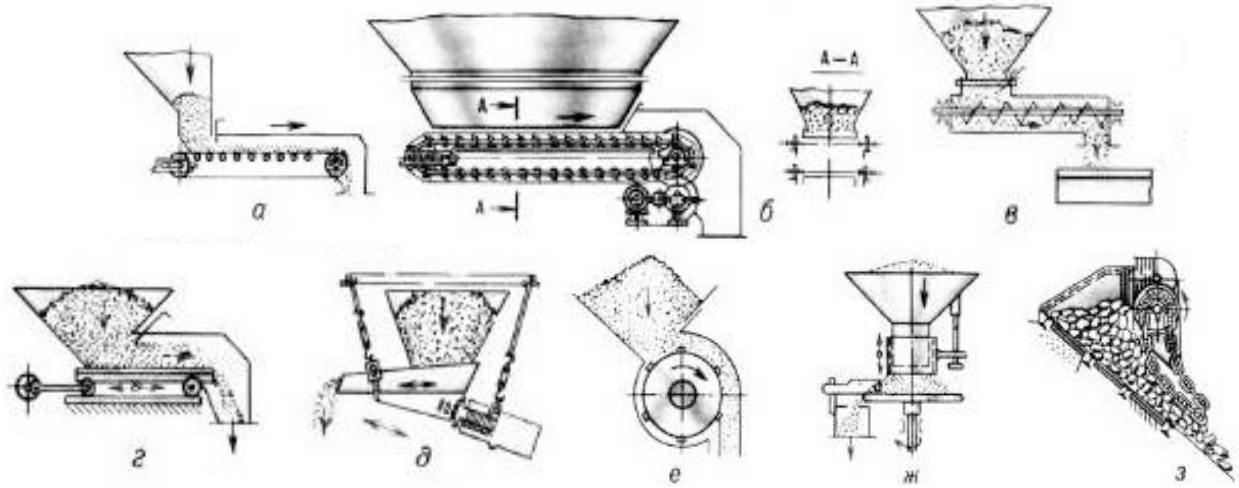


Рис. 2.27. Схеми живильників: а) стрічковий, б) пластинчастий, в) гвинтовий, г) хитний, д) вібраційний, є) барабанний, ж) дисковий, з) ланцюговий

Дозатор виконує функцію фасувального пристрою. Залежно від виду пакованої продукції використовуються вагові, об'ємні та комбінаційні типи дозаторів (рис. 2.28).

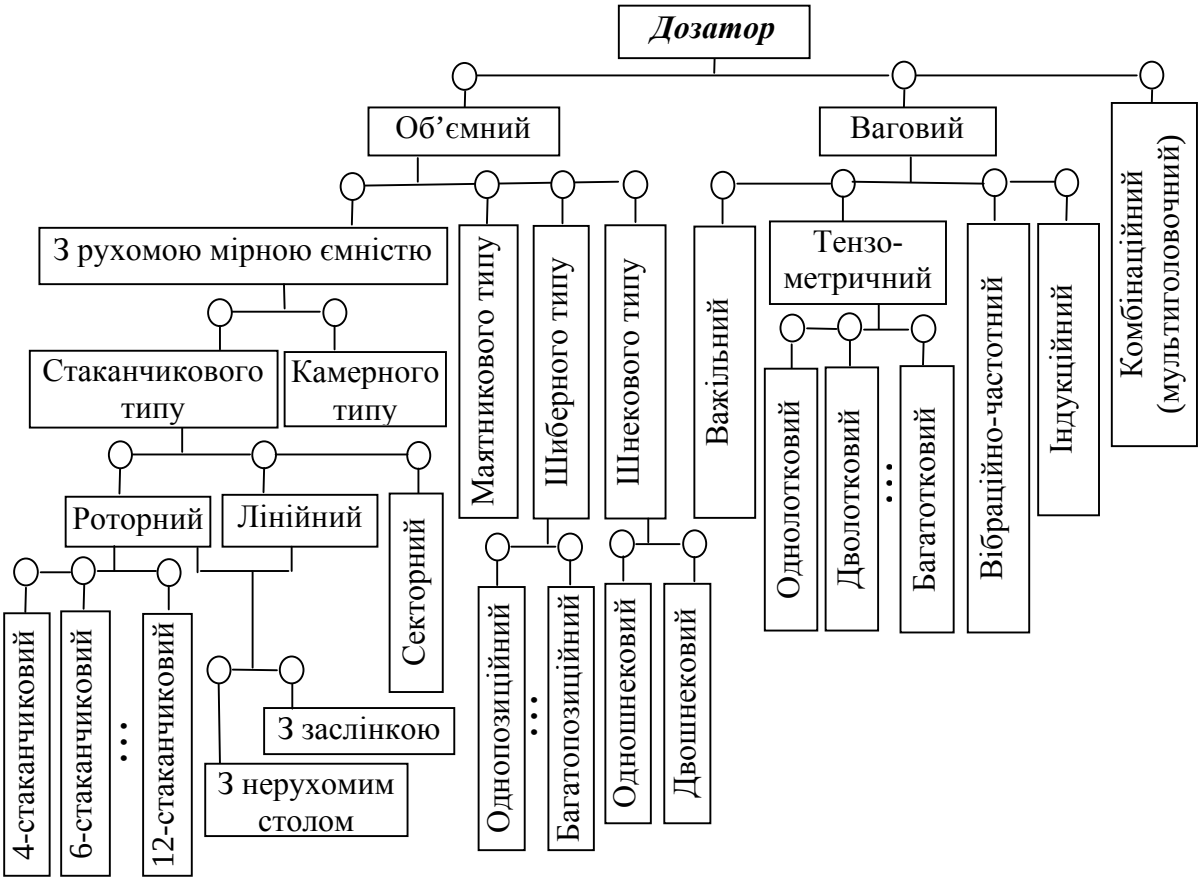
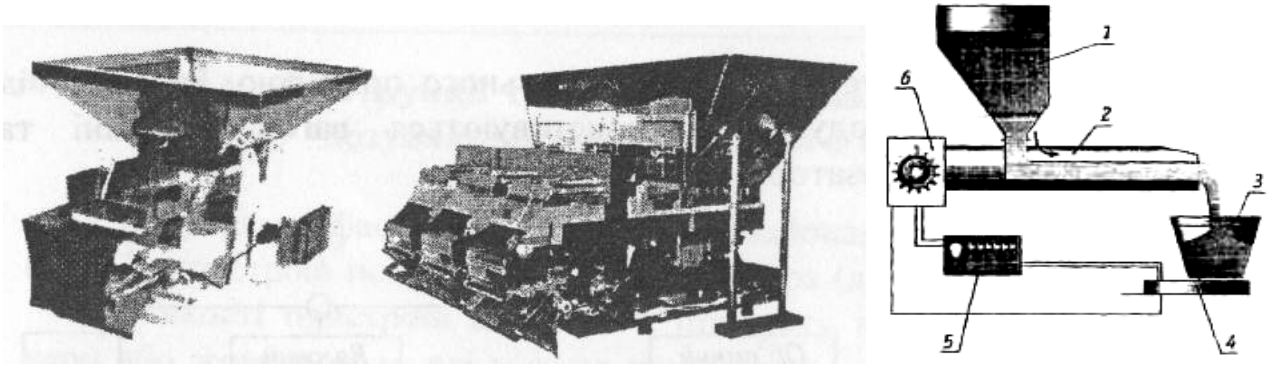


Рис. 2.28. Види дозаторів

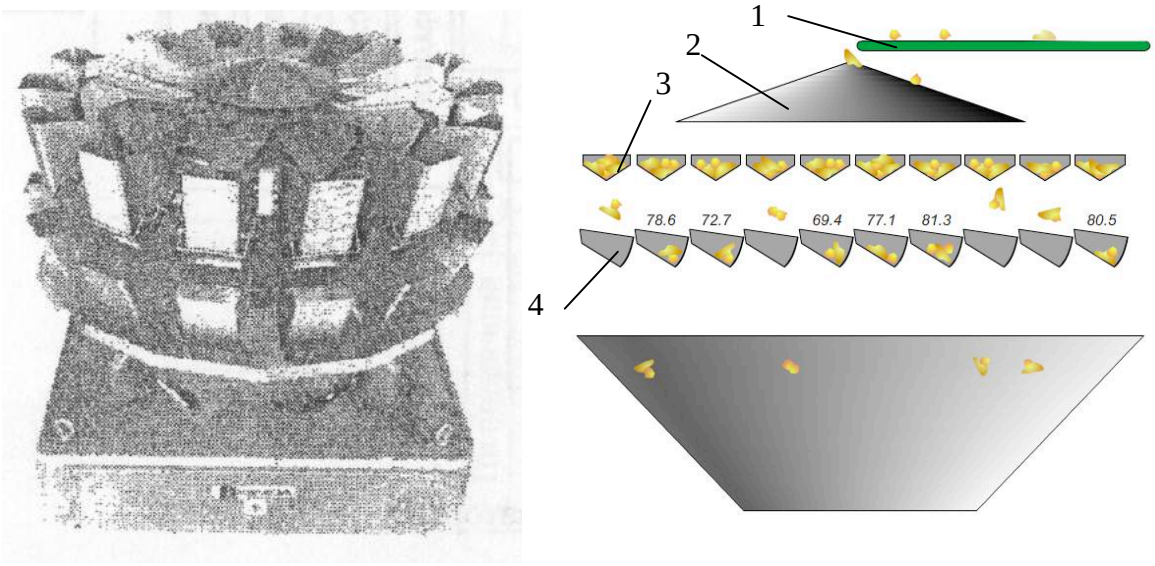
Вагові дозатори відмірюють потрібну дозу сипкого матеріалу безпосереднім її зважуванням важільним або тензометричним вимірювальним пристроєм. Вагові дозатори можуть бути встановлені паралельно, утворюючи декілька паралельних потоків дозування (дволотковий, трилотковий і т.д.) (рис. 2.29).

Комбінаційні (мультиголовочні) вагові дозатори виконані у вигляді мірних ємностей, що наповнюються пакованим продуктом окремо одна від одної. Формування необхідної дози відбувається з допомогою обчислювального блоку шляхом фасування із тих комірок, сукупна маса продукту в яких найбільш близька до заданої (рис. 2.30).



а) б) в)

Рис. 2.29. Ваговий дозатор для сипких харчових продуктів: а) загальний вигляд одно лоткового дозатора; б) загальний вигляд трилоткового дозатора; в) принципова схема (1–бункер; 2– транспортна система; 3– мірна місткість; 4– датчик ваги; 5– система керування; 6– привод транспортної системи)



а) б)

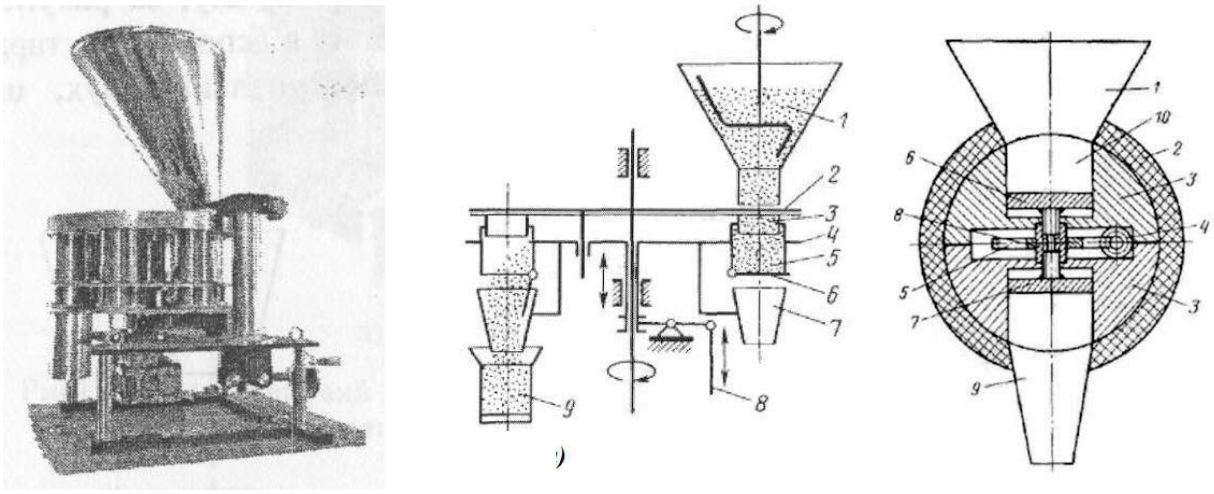
Рис. 2.30. Мультиголовочний ваговий дозатор:
а) загальний вигляд, б) принципова схема (1 – живильник, 2 – диспенсер, 3 – лоток, 4 – вимірювальна ємкість, 5 – центральний контролер)

Об’ємні дозатори відмірюють потрібну масу продукту опосередковано за об’ємом, який займає задана доза матеріалу. Розрізняють такі типи об’ємних дозаторів як: роторний, шнековий, шиберний, маятниковий.

До **роторних** відносяться стаканчиковий та камерний дозатори. В дозаторах вимірювальна ємкість здійснює обертовий рух у верти-

кальній (камерний дозатор) або горизонтальній (стаканчиковий дозатор) площині.

Об'ємний дозатор із телескопічними мірними стаканами (рис. 2.31, а) складається із бункера 1, верхнього диска 2 із стаканами 3, нижнього диска 4 із стаканами 5. Стакани 3 і диска 5 утворюють мірну ємкість, яка в нижній частині перекривається заслінкою 6. Величина дози змінюється переміщенням нижнього диска 4 за допомогою механізму 8. Відміряна порція продукту висипається із мірної ємкості і подається в упаковку 9.



а) б) в)

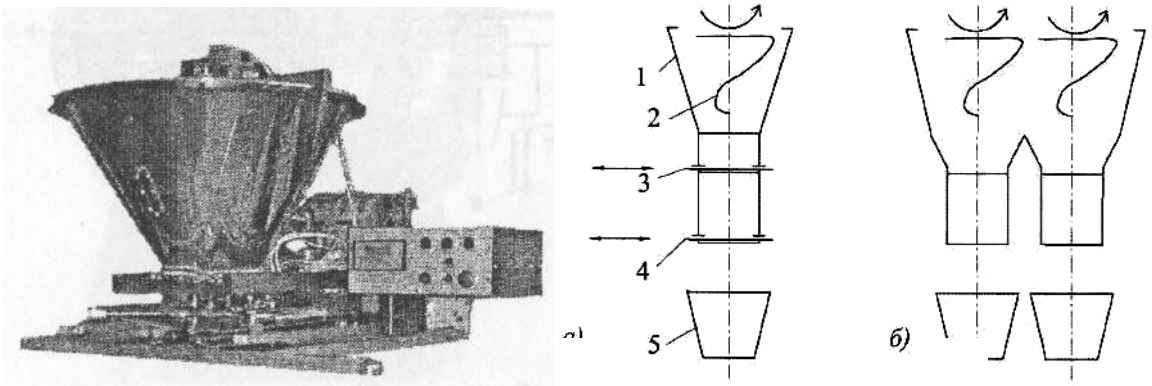
Рис. 2.31. Роторні дозатори: а) загальний вигляд; б) принципова схема стаканчикового дозатора (1 − бункер, 2 − верхній диск, 3 − верхній стаканчик, 4 − нижній диск, 5 − нижній стаканчик, 6 − заслінка, 7 − воронка, 8 − механізм регулювання дозатора, 9 − упаковка); в) принципова схема камерного дозатора (1 − бункер, 2 − корпус, 3 − барабан, 4 − червяк, 5 − червячне колесо, 6,7 − поршень, 8 − втулка, 9 − воронка, 10 − мірна ємкість)

Камерний дозатор складається із бункера 1, корпуса 2, в якому розміщені два половинчастих барабани 3. В отворах барабанів розміщені поршні 6 і 7, утворюючи мірні ємкості 10. Регулювання дози здійснюється шляхом переміщення поршнів за допомогою черв'яка 4, колеса 5, втулки 6.

При обертанні половинчастих барабанів у корпусі верхня мірна ємкість заповнюється продуктом, і з нижньої ємкості він висипається в упаковку.

Дозатор шиберного типу не передбачає переміщення мірної ємкості**.** Доза відміряється об'ємом продукції, розміщеної у мірній ємкості між двома шиберами – нижнім і верхнім (рис. 2.32). В момент формування дози нижній шибер 4 перекриває отвір вихідного каналу дозатора, а верхній 3-відкритий. Продукт під дією гравітаційної сили переміщається в мірний канал дозатора.

При наявності тари і заповнені мірного канала продукцією верхній шибер 3 перекриває канал переміщення продукції із бункера 1 в мірний канал. Таким чином між двома шиберами відсікається об'єм продукції, рівний величині дози. За командою системи керування нижній шибер відкриває нижній отвір каналу, за рахунок чого продукція переміщується у воронку 5 і в споживчу тару. Здебільшого шибери здійснюють зворотно поступальний рух, що забезпечується пневмоприводом.



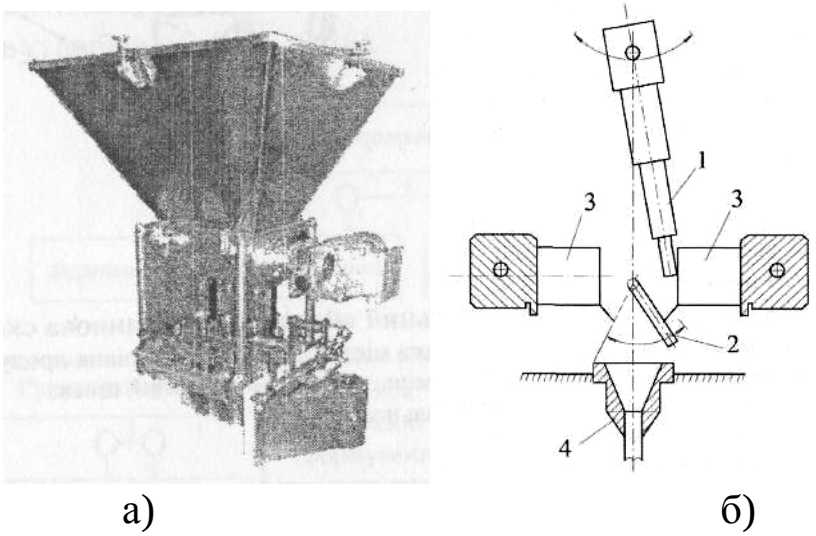
а) б) в)

Рис. 2.32. Дозатор шиберного типу: а) загальний вигляд; б, в) схеми виконання шиберного дозатора: 1 − бункер; 2 − мішалка; 3,4 –верхній і нижній шибери; 5 − випускна воронка

Дозатор маятникового типу. Схема дозатора маятникового типу представлена на (рис. 2.33). Дозатор складається із ємкості, в якій як маятник переміщається заслінка, почергово торкаючись двох протилежних стінок мірних ємкостей 3.

Продукція переміщається в ту частину мірної ємкості, що закрита заслінкою. В заданий момент часу заслінка переміщається в друге положення, і доза продукції виходить із дозатора. В цей час друга частина ємкості заповнюється продукцією. Синхронізація рухів

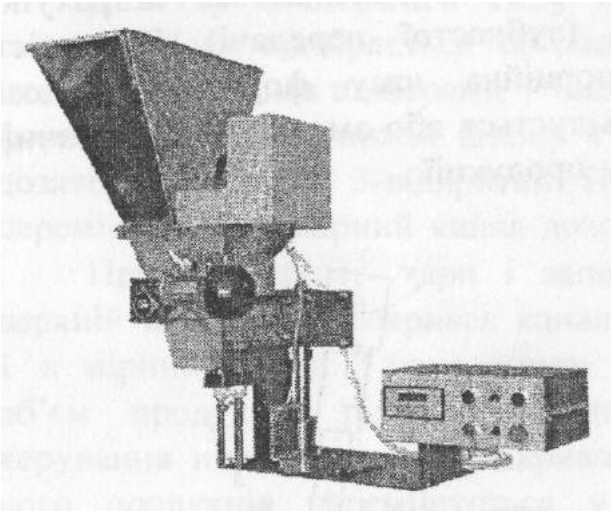
маятника 2 (заслінки) і продуктопровода здійснюється за рахунок жорстких кінематичних зв'язків (зубчастої передачі). Тривалість періоду коливання прямо пропорційна часу формування дози. Змінюючи період коливання, збільшується або зменшується величина дози за постійної величини потоку продукції.



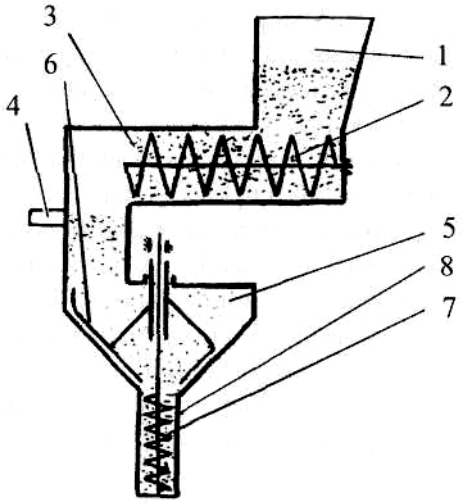
а) б)

Рис. 2.33. Маятниковий дозатор: а) загальний вигляд; б) принципова схема (1 – продуктопровід; 2 – маятник (заслінка); 3 –мірні ємкості; 4 − канал для переміщення продукції в упаковку)

Шнековий дозатор. Цей тип дозаторів використовують для дозування важкосипкої продукції (порошкові та пилоподібні продукти: мука, крохмаль та ін.). На рис. 2.34 представлена схема шнекового дозатора. Конструкція якого складається з конічного бункера 5, з якого вертикальним шнеком 7 відбирається та видається порція продукції. Вище конічного бункера розташована проміжна ємкість 3, де підтримується заданий рівень продукції, і горизонтальний шнек живлення, який періодично вмикається, доповнюючи кількість продукції у проміжній ємкості. В конічному бункері постійно обертаються лопаткові мішалки 6, які запобігають злипанню продукції в бункері і підтискають її до дозувального шнека. Величина дози визначається геометричними параметрами дозувального шнека (зовнішній і внутрішній діаметр шнека, крок гвинтової поверхні) і числом обертів шнека.



а)



б)

Рис. 2.34. Шнековий дозатор: а) загальний вигляд, б) принципова схема:
1 – бункер; 2 – живильний шнек; 3 – проміжна місткість; 4 – датчик рівня продукту;
5 – конічний бункер; 6 – лопаткові мішалки; 7 – дозувальний шнек;
8 – корпус дозувального шнека

Статистичний аналіз наявності того чи іншого варіанту конструкції дозатора у складі автоматів різних виробників пакувальної техніки показано на рис. 2.35.

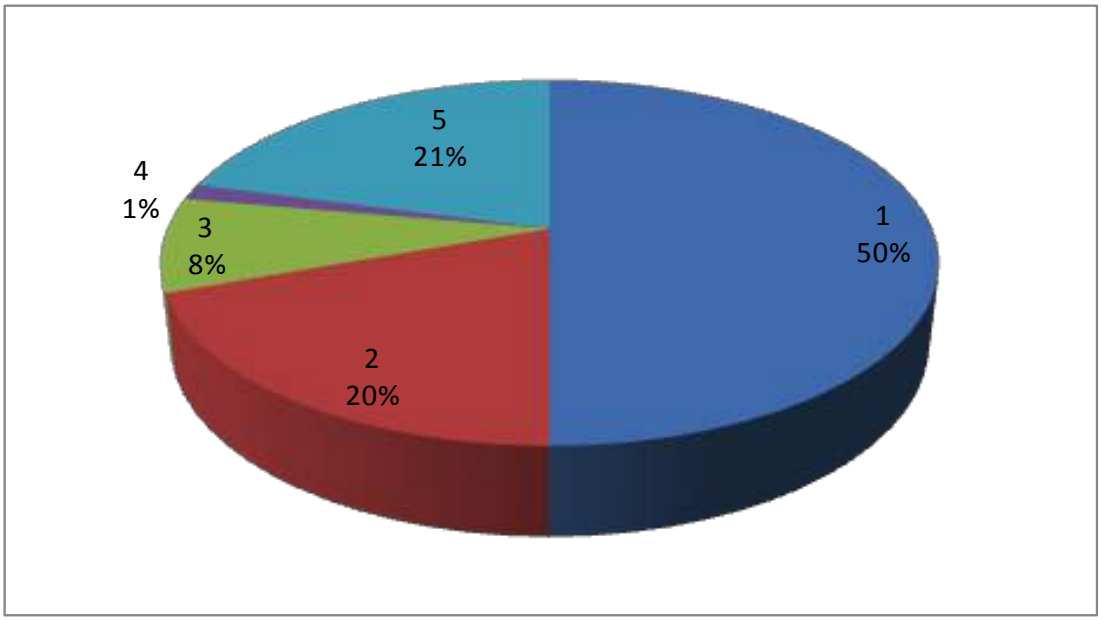


Рис. 2.35. Співвідношення наявності у складі пакувальних автоматів різних типів дозаторів: 1 − ваговий електронний; 2 − об'ємний; 3 − комбінаційний (мультиголівка); 4 − шнековий; 5 − змінний

2.4.2. Конструкції типових функціональних модулів пакувального блоку

Рукавоутворювачі використовують для виготовлення об'ємних упаковок при формуванні плівкового рукава вертикальним і горизонтальним способами шляхом протягування плівки через формоутворювачі (рис. 2.36).

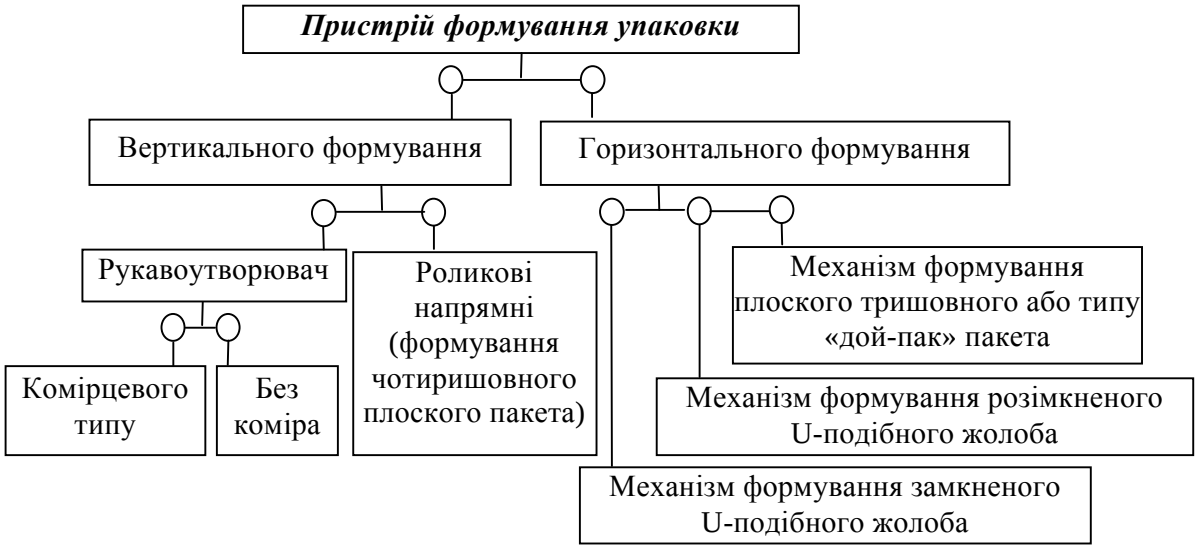


Рис. 2.36. Види пристроїв формування упаковки

Формоутворювачі, які в основному виконуються у вигляді комірця (рис. 2.37, а,б) або системи роликів чи направляючих (рис. 2.37, в, г), а з метою запобігання появі складок під час поперечного зварювання можуть бути обладнані спеціальними механізмами натягу (рис. 2.37, д).

Рукавоутворювач складається з вертикальної труби 2, форма поперечного перерізу якої визначає форму рукава і напрямної поверхні (комірця) 1, а лінія їх перетину утворює формувальний контур. Для накладання країв згорнутої у рукав плівки, комірець може закінчуватись язичками 3.

Системи роликів чи направляючих використовуються при формуванні плоских тришовних пакетів, пакетів типу "доу-пак", а також

розімкненого або замкненого U-подібного жолоба для упаковок типу “флоу-пак”.

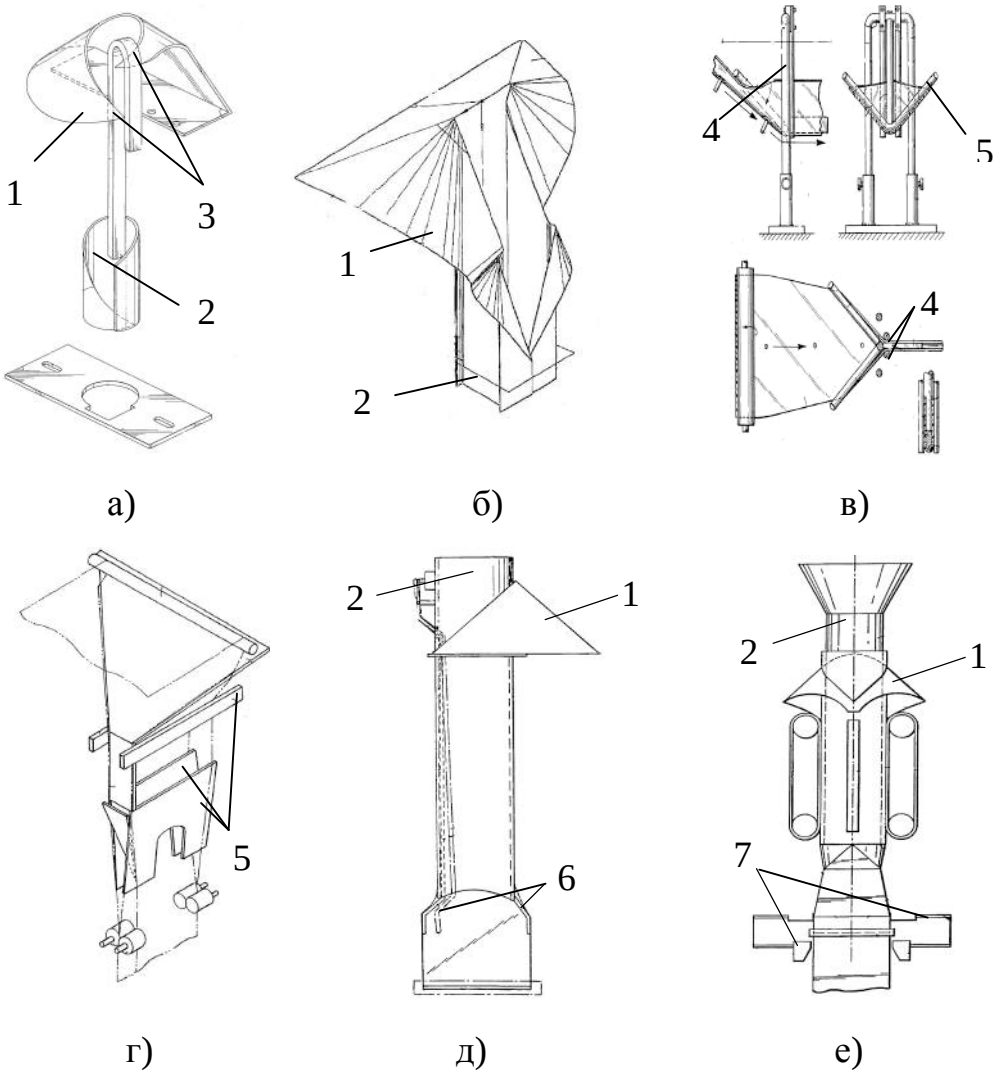


Рис. 2.37. Механізми формування рукава: а, б) формуючий комірець, в, г) направляючі; д) з натяжним механізмом; е) з механізмом формування складки (1 – комір, 2 – труба, 3 − язички, 4 – формуючі ролики, 5 – направляючі, 6 − натяжний механізм)

Для формування рукава найчастіше застосовується вертикальний спосіб (2.38), який реалізується рукавоутворювачем у вигляді труби із комірцевою поверхнею, або без неї, причому форма поперечного перерізу труби визначає форму рукава. При горизонтальному способі утворення рукава використовується система роликів чи направляючих.

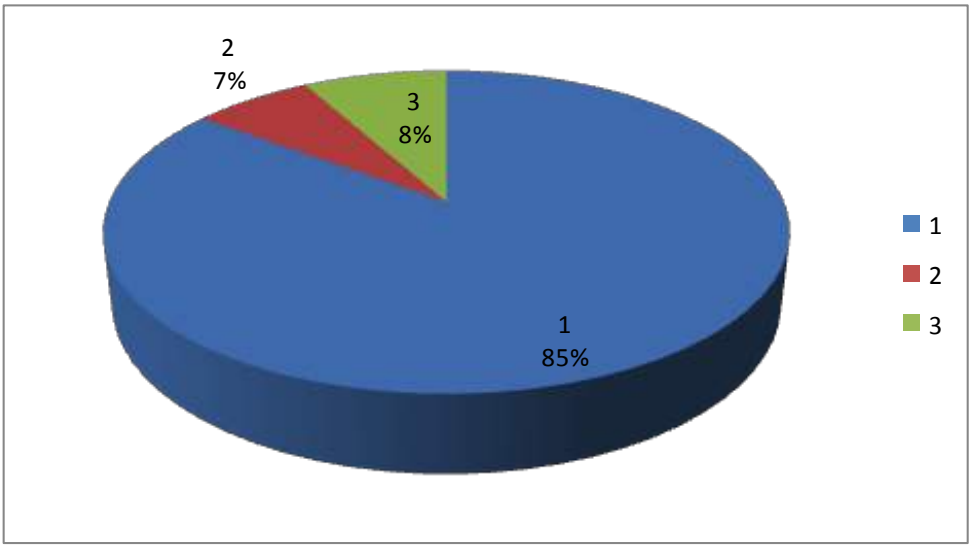


Рис. 2.38. Співвідношення типів рукавоутворювачів:
1 − один вертикальний; 2 − один нахилений; 3 − кілька вертикальних

Зварювальні пристрої в машинах для пакування сипких речовин використовуються для створення поздовжнього та поперечних зварних швів упаковки та бувають таких видів (рис. 2.39).

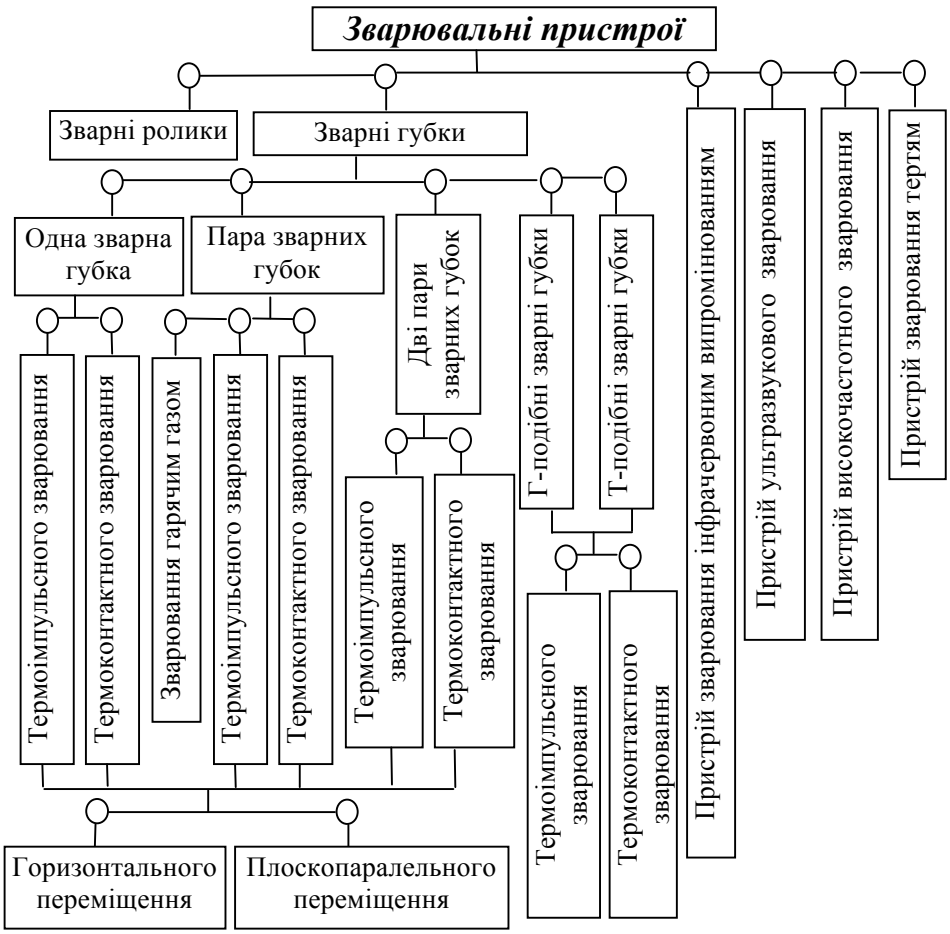
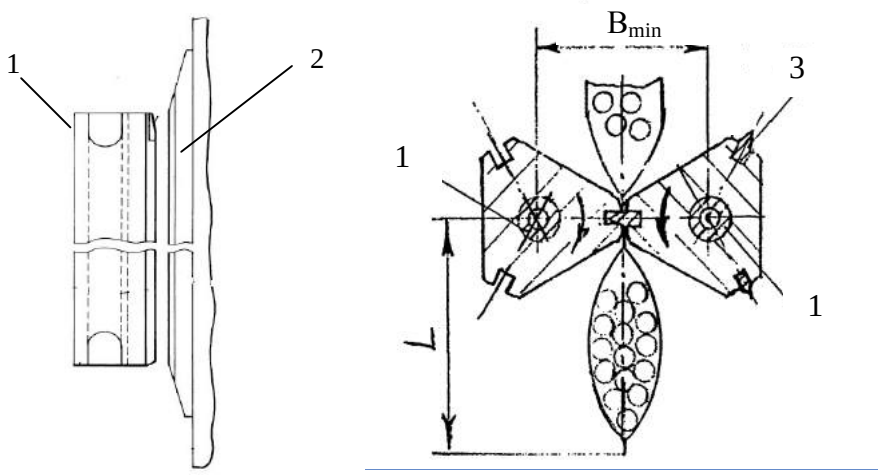


Рис. 2.39. Види зварювальних пристроїв

Зварювальні пристрої поздовжнього зварювання служать для утворення поздовжніх зварних швів пакетів (центрального – в тришовному, бічних – в чотиришовному) при дискретному (лінійний тип) чи неперервному переміщенні плівки.

Зварний механізм лінійного типу виконується у вигляді однієї чи кількох розігрітих до температури зварювання губок 1 (рис. 3.40), що здійснюють зворотно-поступальний рух перпендикулярно до площини шва.

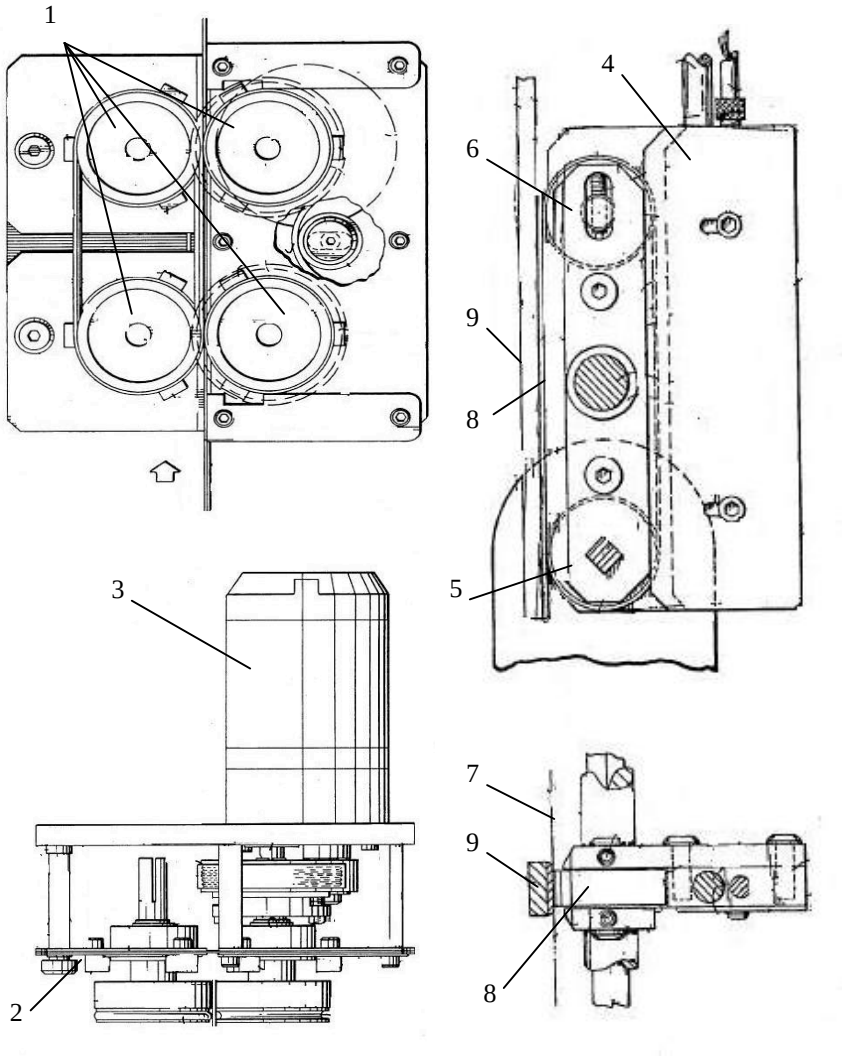


а) б)

Рис. 2.40. Пристрої поперечного зварювання:
а) лінійного типу; б) роторного типу: 1 – зварна губка,
2 – рукавоутворювач або опорна площина; 3 – відрізний ніж, L – крок переміщення зварних губок; B_{min} – мінімальна відстань між роторами

Безперервне утворення швів здійснюється розігрітими роликами чи стрічкою. Роликовий зварний механізм (рис. 2.41, а) складається з двох пар роликів 1, закріплених на пластині 2. Одна пара приводиться в рух від електродвигуна 3, через зубчату чи пасову передачі. Друга пара роликів обертається під дією сили тертя при проходженні плівки. Стрічковий зварний механізм (рис. 2.41, б) являє собою нагрівальний елемент 4, та систему ведучого 5 і натяжного 6 роликів, навколо яких натягнута стрічка 6. Утворення зварного шва відбувається при протягуванні і одночасному стисканні шарів плівки 7 між розігрітою стрічкою 8 та опорною площадкою 9.

Механізми поперечного зварювання призначені для утворення поперечного шва знизу та зверху пакета. В переважній більшості випадків виконані у вигляді зварних губок, об’єднаних з ножем для



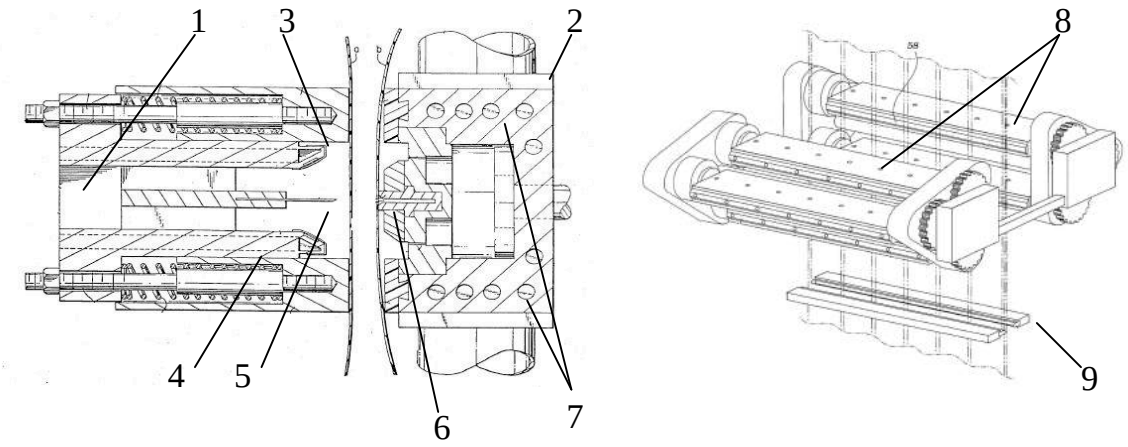
а) б)

Рис. 2.41. Механізми поздовжнього зварювання: а) стрічковий; б) роликовий
(1 − зварювальні ролики, 2 – пластина, 3 – електродвигун,
4 − нагрівальний елемент, 5 – ведучий ролик, 6 – натяжний ролик, 7 – плівка,
8 – стрічка, 9 – опорна площадка)

відрізання пакета (рис. 2.42, а). Такий механізм складається з пари здвоєних зварних губок 1 та 2, одна з яких може бути закріплена нерухомо. В просторі між підпружиненими елементами 3, 4 для зварювання верхнього та нижнього швів встановлений ніж 5. При змиканні він проходить в паз 6, на шляху відрізаючи нижній пакет. Нагрів губок здійснюється ТЕНами 7, встановленими в їх корпусі.

При виготовленні пакетів невеликого розміру застосовують поперечний зварний механізм обертової дії (рис. 2.42, б). Він складається з двох наборів зварних губок 8, кожен з яких має спільний привод від планетарної передачі. При обертанні кожна пара губок змикається для утворення шва. Одночасно з цим відбувається протягува-

ння заготовки пакета на крок. Механізм відрізання 9 в такому випадку може встановлюватися окремо.



а) б)

Рис. 2.42. Механізми поперечного зварювання при безперервному русі плівки: а) зварна губка з вмонтованим ножем для відрізання пакета, б) зварні губки обертової дії: 1,2,8 – зварні губки, 3, 4 – зварювальні елементи, 5,9 – ніж, 6 – паз, 7 – ТЕНи

Залежно від конструкції зварних елементів зварювання буває термоконтактним, термоімпульсним чи комбінованим (гарячим газом і термічним імпульсом) [80].

Відсоткове співвідношення видів зварювальних механізмів у структурі машин для пакування сипких речовин приведено на рис. 2.43.

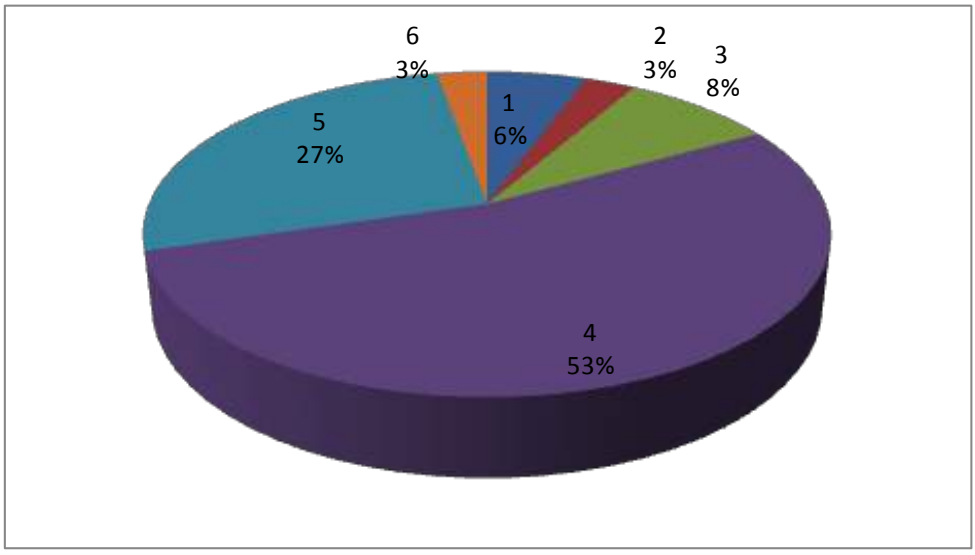


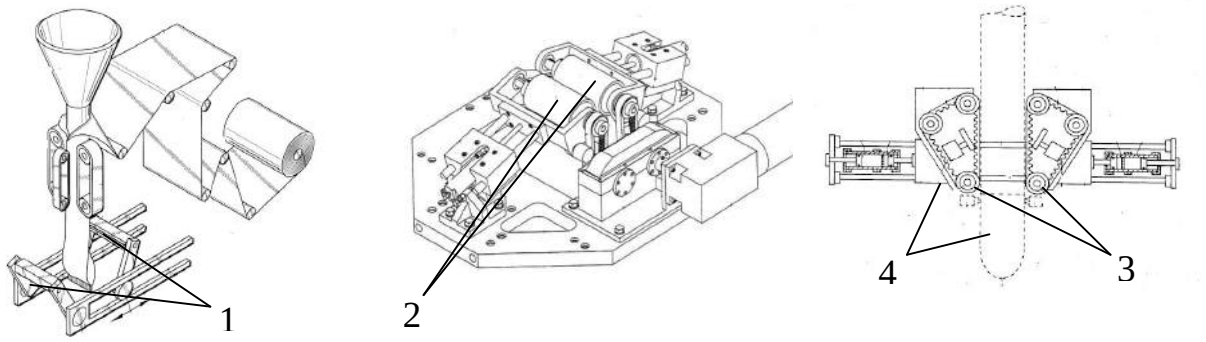
Рис. 2.43. Розподіл функцій механізму поперечного зварювання:
1 − утворення зварного шва; 2 − тиснення дати при утворення зварного шва; 3 − протягування і розрізаня пакетів під час зварювання; 4 − відрізання і датування при зварюванні; 5 − протягування і датування при зварюванні; 6 − протягування, відрізання і датування під час зварювання

Механізми протягування відносяться до механізмів руху плівки (рис. 2.44) і застосовуються для переміщення плівкового рукава на крок, що відповідає заданій довжині пакета.

Рис. 2.44. Види механізмів руху плівки

Найбільш поширеними окремими механізмами протягування є ролики та стрічковий механізм. Зчеплення з плівкою відбувається під дією розрідження в камерах роликів, або сил тертя відповідно.

Протягування поперечними зварними губками 1 (рис. 2.45, а) здійснюється одночасно з утворенням поперечних швів.



а) б) в)

Рис. 2.45. Типи механізмів протягування: а)протягування поперечною зварною губкою; б) протягування роликами протяжки; в) протягування парним стрічковим механізмом

Існують також окремі механізми протягування: ролики протяжки 2 (рис. 2.45, б) або стрічка 3, що натягнута на ролики 4 (рис. 2.45, в). Зчеплення з плівкою відбувається під дією сил тертя або розрідження в камерах ролика.

Співвідношення застосування механізмів для протягування рукава приведене на рис. 2.46.

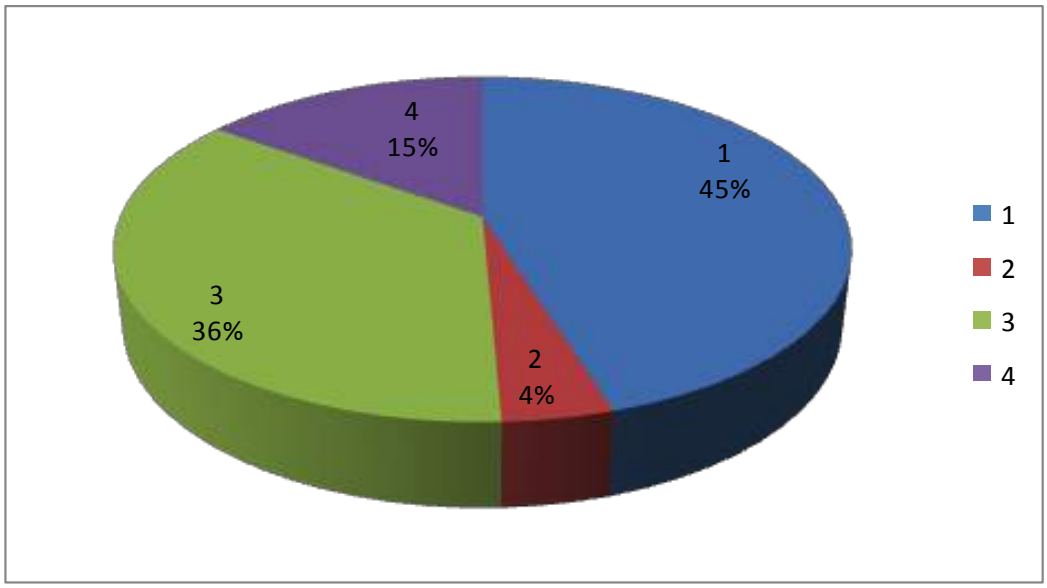


Рис. 2.46 Співвідношення застосування механізмів для протягування рукава: 1 − натяжні ремені; 2 − пневмозахвати; 3 − губки зварювання; 4 − натяжні ролики

Механізм відрізання призначений для відділення готової упаковки від суцільного рулонного матеріалу. За структурою ці механізми можуть бути електричними та механічними (рис. 2.47).

Механізми з нормальним рухом мають або зворотний (поступальний або коливальний) рух різальних органів (рис. 2.48, а − 2.48, е), або односторонній − обертовий (рис. 2.48, ж, 2.48, з). Механізми із похилим (рис. 2.48, к) і дотичним (рис. 2.48, л − 2.48, н) рухом застосовуються тільки з різальними елементами, що обертаються навколо осей.

Електричні розплавляють полімерний матеріал в зоні контакту з нагрівним елементом. Механічні складаються із рухомого різального елементу – леза, та нерухомого – протиопори. Механізми зі зворотно-поступальним, або коливальним рухом леза використовують для різання нерухомої плівки, а ті, в яких леза здійснюють обертовий рух навколо осі – як для рухомої, так і нерухомої. Крайка леза і протиножа може бути прямою, пласкою або просторовою кривою, а також пилкоподібною – у вигляді ломаної лінії (рис. 2.48).

Рис. 2.47. Види механізмів відрізання

Площина, дотична до поверхні різання, проведена через лінію перетину поверхні різання з площиною плівки, складає з останньою кут, який для різних схем різання є у межах від 0° до 90°, залежно від чого змінюються і конструктивні особливості механізму. За цією ознакою схеми різання поділяються на дві групи: рух леза по нормалі до плівки (кут дорівнює або наближено дорівнює 90°); рух леза по дотичній до плівки (кут дорівнює або наближено дорівнює 0°); рух леза під кутом до плівки (кут − у межах 0° − 90°, але не дорівнює цим значенням).

У процесі формування упаковки із рулонного пакувального матеріалу важливим є дотримання незначних коливань натягу плівки. У будь-якій високопродуктивній пакувальній системі із періодичним або безперервним режимом роботи передбачена функція амортизації і акумулювання пакувального матеріалу.

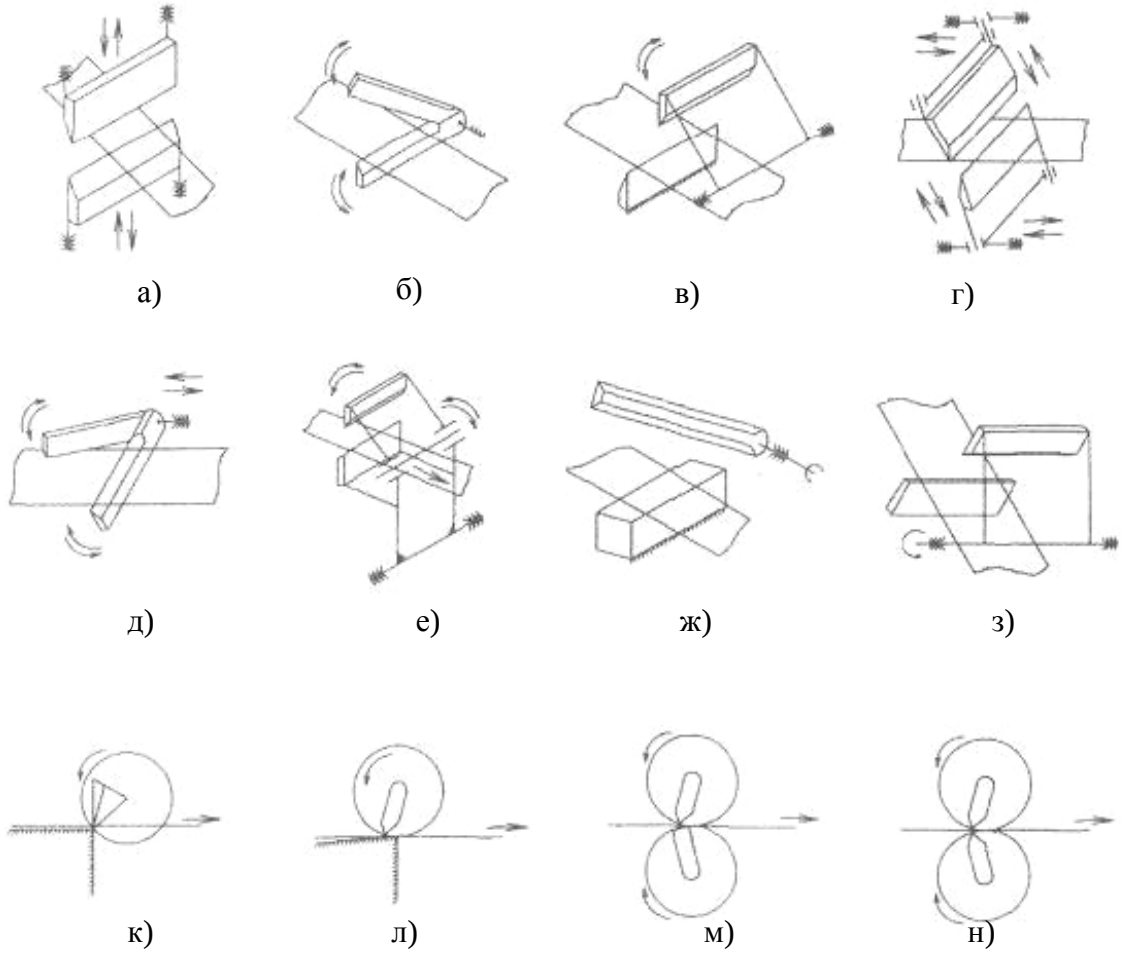


Рис. 2.48. Схеми механізмів відрізання: а) механізм зі зворотно-поступальним рухом леза; б) механізм з коливальним рухом навколо осі паралельно площині плівки; в) механізм з коливальним рухом навколо осі перпендикулярно площині плівки; г − е) механізми для відрізання рухомої плівки; ж, з) леза обертаються навколо осі; к) механізм похилим рухом; л − н) механізм дотичним рухом

Механізми амортизації, залежно від способу накопичення матеріалу, можна поділити на дві групи: з вільно сформованою петлею матеріалу та з примусово натягненою петлею. По кількості петель, що визначають запас матеріалу, розмотаного із рулону, механізми можуть бути поділені на однопетлеві і багатопетлеві (рис. 2.49).

Механізми з вільним формуванням петлі застосовуються у тих випадках, коли плівка розмотується з рулону і подається на подальшу обробку двома окремими системами руху. Плівка в петлю подається механізмом, що розмотує рулон, а вибирається із петлі при подачі її на подальшу обробку.

Механізми з примусово натягненою петлею можуть застосовуватися як при наявності окремого механізму для розмотування рулону, так і при виконанні функції розмотування рулону і подачі плівки одним механізмом. В останньому випадку натяг плівки, що створюється механізмом руху через петлеутворюючий елемент, змінює положення вантажу або пружини, які, повертаючись в початкове положення, натягують плівку, що сприяє її розмотуванню з рулону. Такі механізми застосовуються як для накопичення запасу плівки між механізмами руху, так і для зменшення коливань натягу плівки, що змотується з рулону.

[14]Рис. 2.49. Види механізмів амортизації плівки

Механізми з вільно направленою петлею (рис. 2.50, а) найбільш конструктивно прості, але за потреби значного запасу плівки в петлі потрібно передбачити значні геометричні розміри механізму. Для усунення цього недоліку такі механізми виконуються багатопетлевими, з напрямними площинами тощо (рис. 2.50, б, 2.50, в).

У механізмах із примусово натягненою петлею робочий орган діє на петлю в її вершині, де плівка обгортає ролик, що вільно обертається на осі. Механізм, в якому ролик поступально рухається (рис. 2.50, г), відрізняється від механізму, наведеного на рис. 2.50, б, наявністю петлеутворюючого елемента. В механізмі, що наведений на рис. 2.50, д, ролик встановлюється на кінці важеля, що коливається. У деяких конструкціях важіль виконується гнучким − у вигляді рами, що утворена двома пластинчатими пружинами. На кінці рами встановлюється ролик, а другий її кінець жорстко закріплюється або коливається на осі. В такому конструктивному виконанні забезпечується більш м’яка амортизація за рахунок малої жорсткості рами. Таку ж функцію виконує механізм, наведений на рис. 2.50, е, − комбінований, з поступальними коливальними елемнтами. Якщо обидва елементи підпружинені, то жорсткість одного повинна бути менше жорсткості іншого, що забезпечує плавне прикладання натягу до рулону.

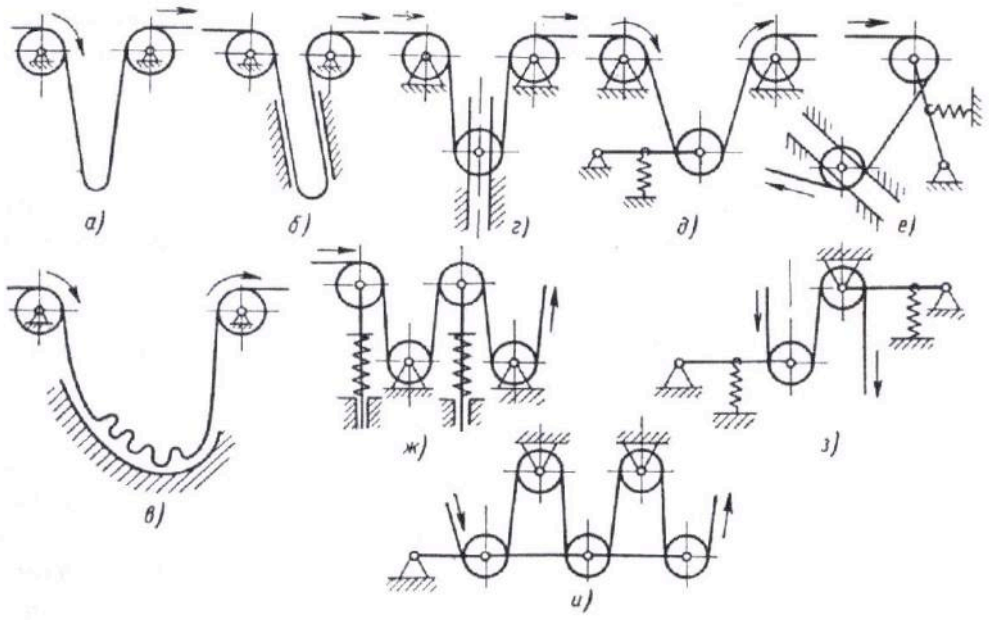


Рис. 2.50. Схеми механізмів амортизації і накопичення плівки:
а) механізм з вільно направленою петлею; б) механізм з напрямними площинами; в) багатопетлевий механізм; г) рухомий ролик з петлеутворюючим елементом; д) ролик, встановлений на коливному важелі; е) комбінований механізм з поступальними коливальними елементами; ж) багатопетлевий механізм із кількома роликами, що рухаються поступально; з) багатопетлевий механізм кількома коливними важелями; и) група роликів на одному коливному важелі

Багатопетлеві механізми із кількома роликами, що поступально рухаються (рис. 2.50, ж), з кількома важелями, що коливаються (рис. 2.50, з), та з групою роликів на одному важелі, що коливається (рис. 2.50, и), забезпечують значний запас плівки при малих габаритних розмірах і значно м'якшу амортизацію, ніж однопетлеві.

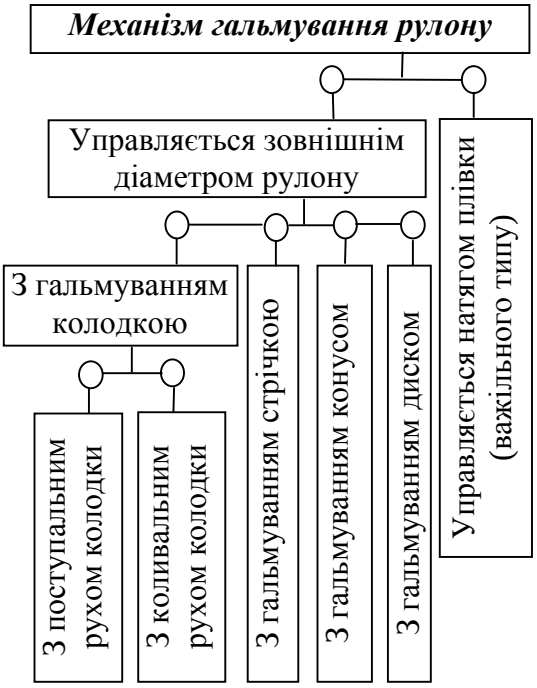


Рис. 2.51. Види механізмів гальмування рулону

Для стабілізації натягу в плівці, що розмотується, і гасіння сил інерції рулону в пристроях подачі застосовують механізми гальмування рулону (рис. 2.51). Найбільш характерні схеми таких механізмів наведено на рис. 2.52.

Механізми гальмування рулону із пакувальним матеріалом залежно від зв'язку гальмівного моменту з параметрами руху можна поділити на ті, що управляються зовнішнім діаметром рулону, і на ті, що управляються натягом плівки. Роль датчика натягу плівки здебільшого виконує петлеутворюючий елемент механізму амортизації.

Механізми, в яких гальмівний момент не залежить від параметрів руху рулону, характеризуються постійним гальмівним моментом, який створюється на гальмівному елементі притисканням до його торця колодки (рис. 2.52, а) або диску (рис. 2.52, б), притисканням до його периферії колодки (рис. 2.52, в), конусу (рис. 2.52, г) або стрічки (рис. 2.52, д).

Механізми з гальмуванням колодкою на периферії рулону (рис. 2.52, ж − з поступальним рухом колодки, рис. 2.52, з − з коливальним рухом) забезпечують постійне значення натягу.

Механізми з гальмуванням стрічкою на периферії рулону (рис. 2.52, и) забезпечують при меншому зусиллі притискання більше гальмівне зусилля.

Різні варіанти таких механізмів наведені на рис. 2.52, к − 2.52, о. У механізмі, наведеному на рис. 2.52, п, важіль діє на електроапаратуру, що керує електроприводом.

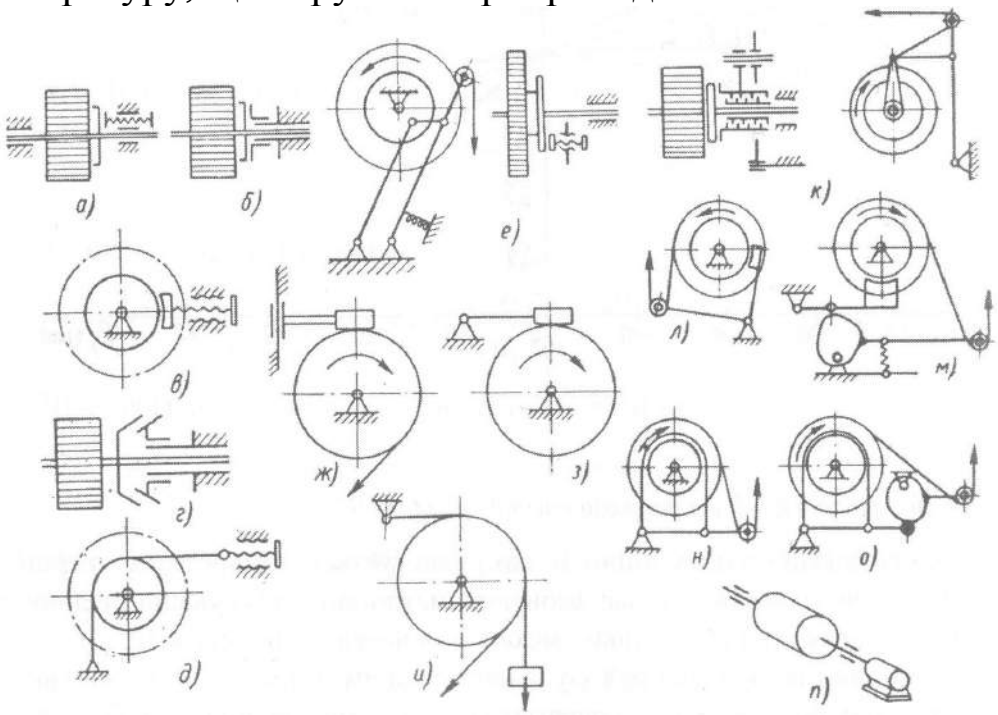


Рис. 2.52. Схеми механізмів гальмування рулону: а, в, ж, з) з гальмівною колодкою; б) з гальмівним диском; г) з гальмівним конусом; д, и-о) з гальмівною стрічкою; п) важільного типу

У пакувальному обладнанні поряд із механізмами гальмування рулону широко застосовують механізми гальмування і зупинки плівки (рис. 2.53). Характерні схеми цих механізмів наведені на рис. 2.54. Ці механізми поділяють на дві групи: приводні і самокеровані.

За видом контакту з плівкою приводні механізми можуть бути пласкими, у яких парні гальмівні органи контактують по площині (рис. 2.54, а) або по лінії (рис. 2.54, б), перегинаючими — з контактом парних органів по поверхні, утвореній ломаною або кривою лінією (рис. 2.54, в), вакуумними − з притисканням вакуумом до одного із органів з пласкою або криволінійною поверхнею (рис. 2.54, г).

До самокерованих механізмів належать самозаклинювальні гальма (рис. 2.54, д), що забезпечують гальмування або зупинку плівки при переміщенні її в напрямку натягу.

Рис. 2.53. Види механізмів гальмування і зупинки плівки

Компоновочні рішення пакувальної машини і особливості технологічного процесу виготовлення упаковки передбачають орієнтацію і зміну напрямку руху пакувального матеріалу. Для реалізації цієї операції застосовують механізми направленого руху плівки (рис. 2.55, 2.56).

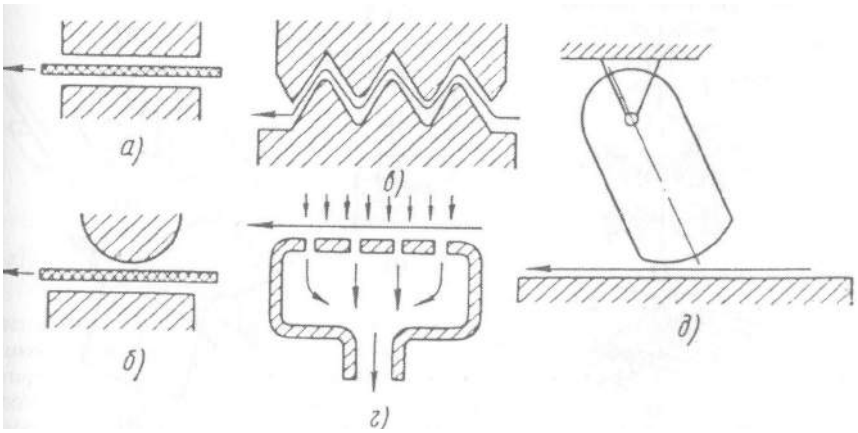


Рис. 2.54. Схеми механізмів гальмування і зупинки плівки:
а) з контактом гальмівних органів по площині; б) з контактом гальмівних органів по лінії; в) з контактом гальмівних органів по поверхні, утворені ламаною або кривою лінією; г) з притисканням вакуумом до одного з гальмівних органів з пласкою поверхнею; д) з притисканням вакуумом до одного із органів з пласкою або криволінійною поверхнею

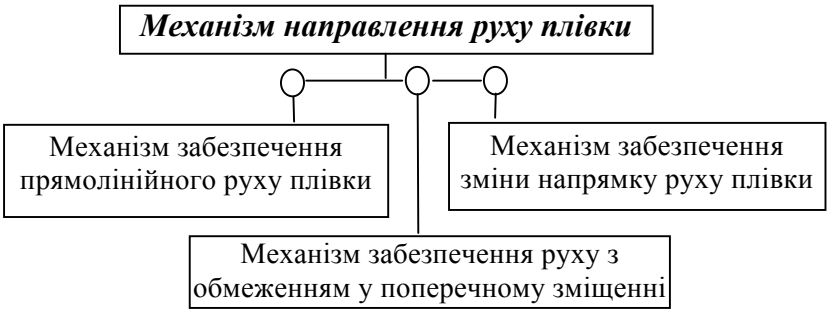


Рис. 2.55. Види механізмів направлення руху плівки

Ці механізми можна поділити на групи залежно від забезпечення виду руху плівки: прямолінійний рух, зі зміною напрямку руху, рух з обмеженням у поперечному зміщенні.

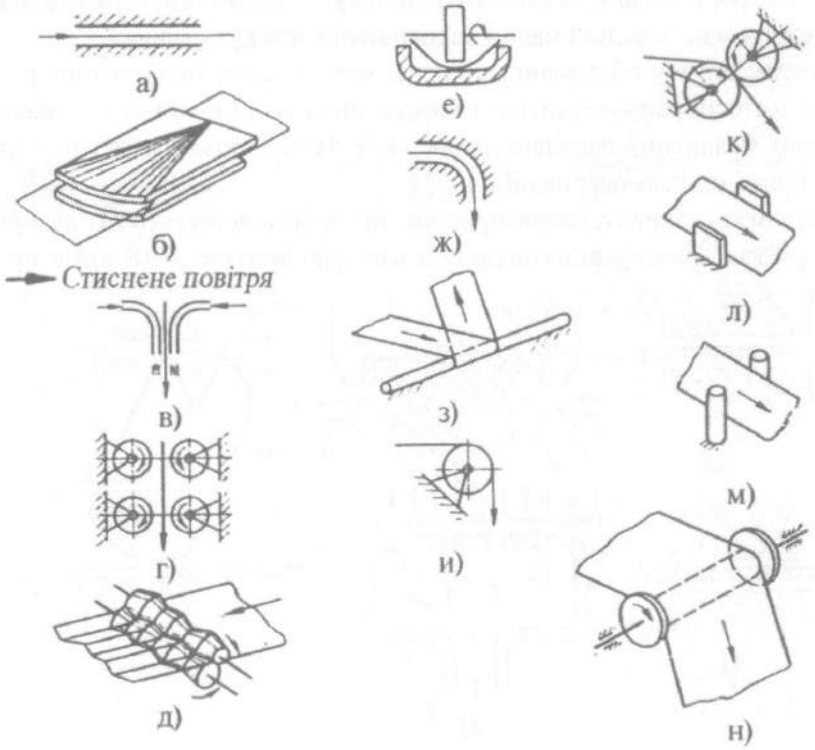


Рис. 2.56. Схеми механізмів направлення руху плівки:
а-е) механізм забезпечення прямолінійного руху плівки; ж-к) механізм забезпечення зміни напрямку руху плівки; л-н) механізм забезпечення руху з обмеженням у поперечному зміщенні

Направляти рух плівки можуть нерухомі або рухомі елементи. Застосування механізмів, що забезпечують прямолінійний рух, потрібне за відсутності в плівці на прямолінійній ділянці гарантованого натягу, який сам може забезпечити прямолінійних рух плівки. Характерні системи механізмів, що забезпечують прямолінійних рух плівки, наведені на рис. 2.56, а − 2.56, е, для зміни напрямку руху − рис.

2.56, ж − 2.56, к і для обмеження в поперечному зміщенні − рис. 2.56, л − 2.56, н.

Датувальний пристрій – пристрій, призначений для нанесення відтиску на упаковку інформації, що змінюється: терміну придатності, дати виготовлення, номеру серії, партії і т. д. [111]. Види датувальних пристроїв приведені на рис. 2.57.

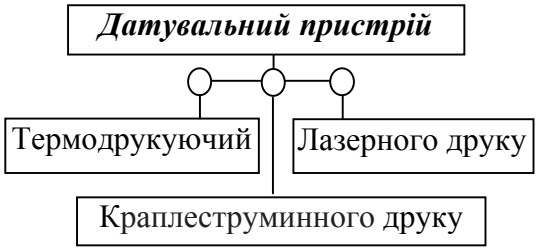


Рис. 2.57. Види пристроїв для нанесення дати

Діаграма використання додаткових функціональних модулів приведена рис. 2.58.

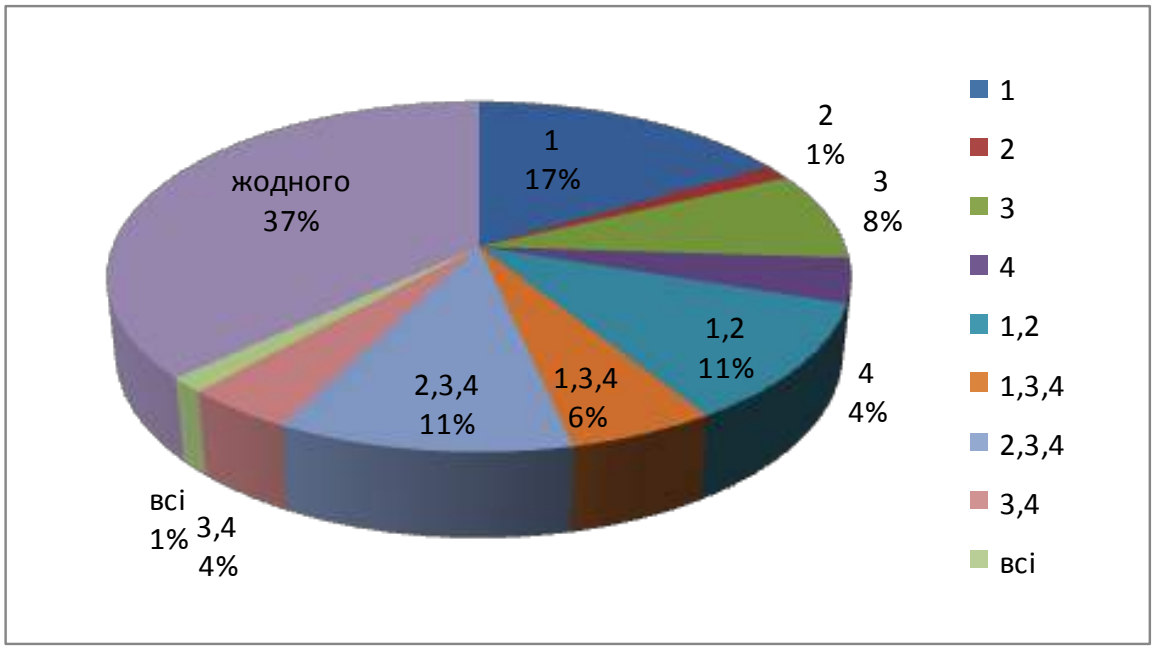


Рис. 2.58. Діаграма використання додаткових функціональних модулів: 1 − датчик фотомітки; 2 − механізм формування плоского дна; 3 − механізм зворушування продукту в бункері; 4 − механізм наповнення упаковки інертним газом.

Для зручності оперування типорозмірами різних ФМ при формуванні бази даних розроблено систему кодування структури машин для пакування сипких речовин (рис. 2.59).

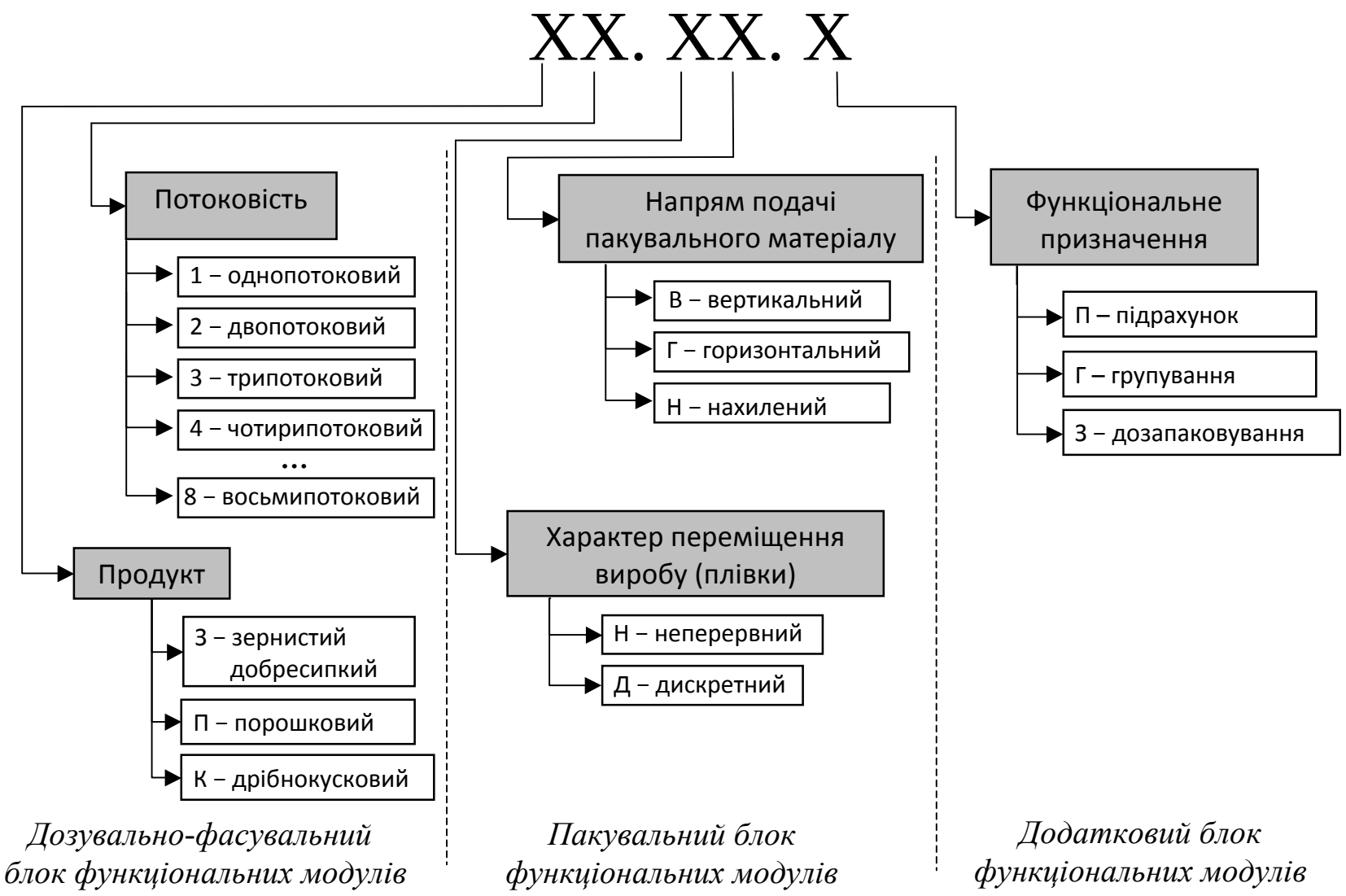


Рис. 2.59. Схема кодування машини для пакування сипких речовин

Дозатори для дозування сипких речовин закодовані наступним чином (рис. 2.60).

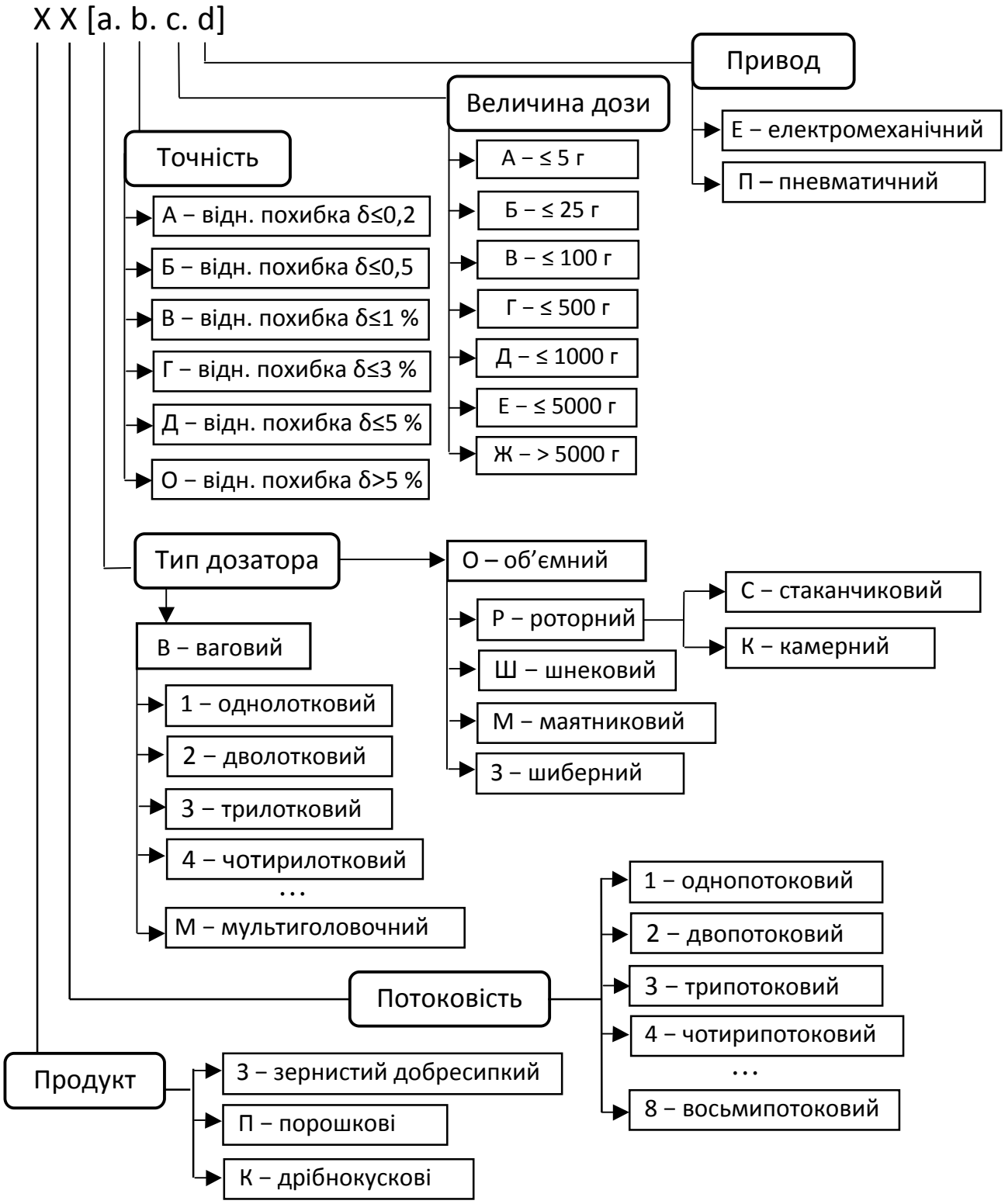


Рис. 2.60. Схема кодування дозаторів дозувально-фасувального блоку

Схеми кодування пакувального блоку функціональних модулів представлено на рис. 2.61, додаткового блоку функціональних модулів – на рис. 2.62.

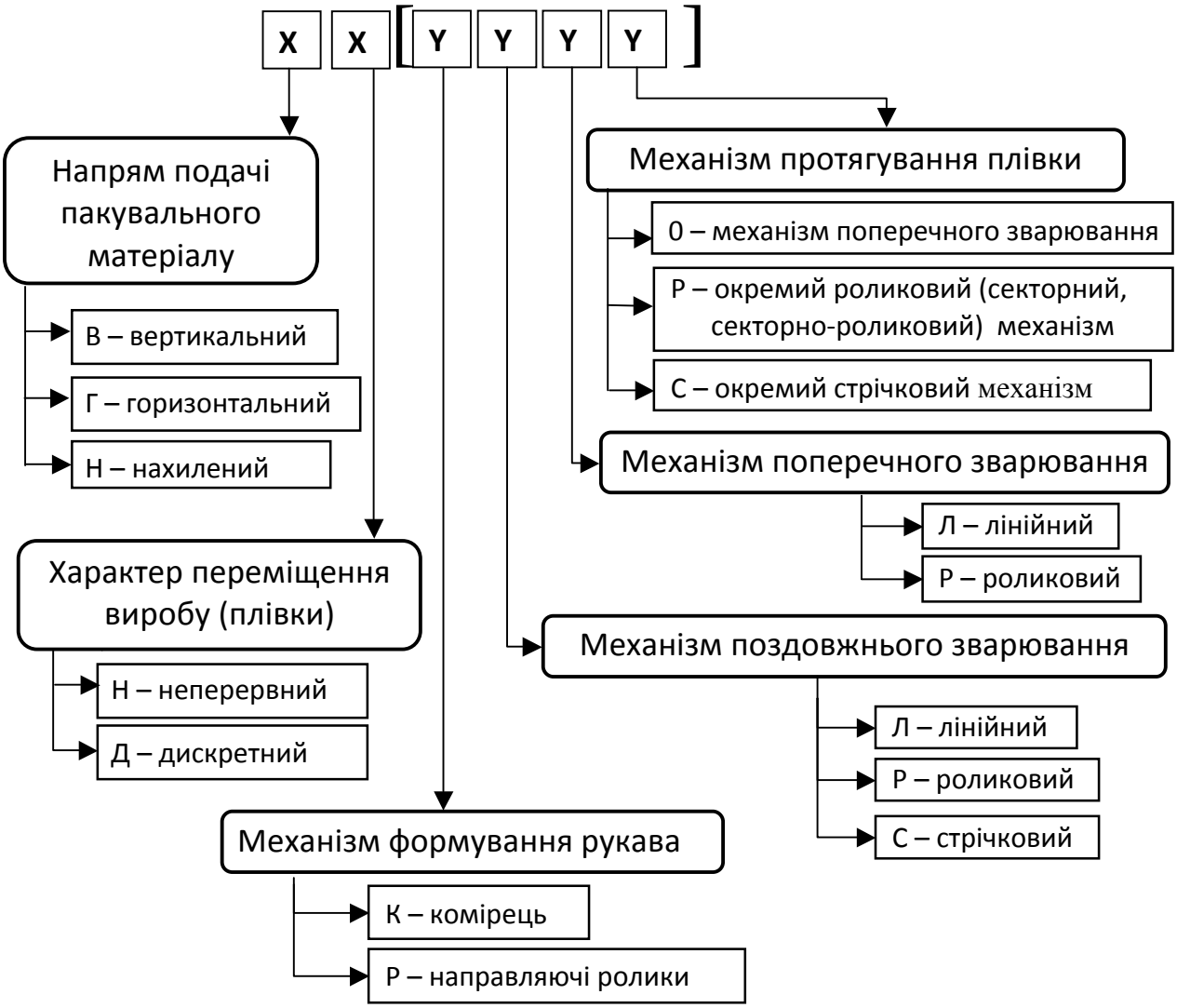


Рис. 2.61. Схема кодування пакувального блоку функціональних модулів

Рис. 2.62. Схема кодування додаткового блоку функціональних модулів

2.5. Концептуальні умови створення нових пакувальних машин і модифікації їх функціонально-модульної структури

Маючи деяке уявлення про об'єкт проектування в вигляді концептуальної моделі, людина засвоює вхідну інформацію $I_{оз}$ і, порівнюючи об'єкт з його представленням, формує дію проектування $I_у$.

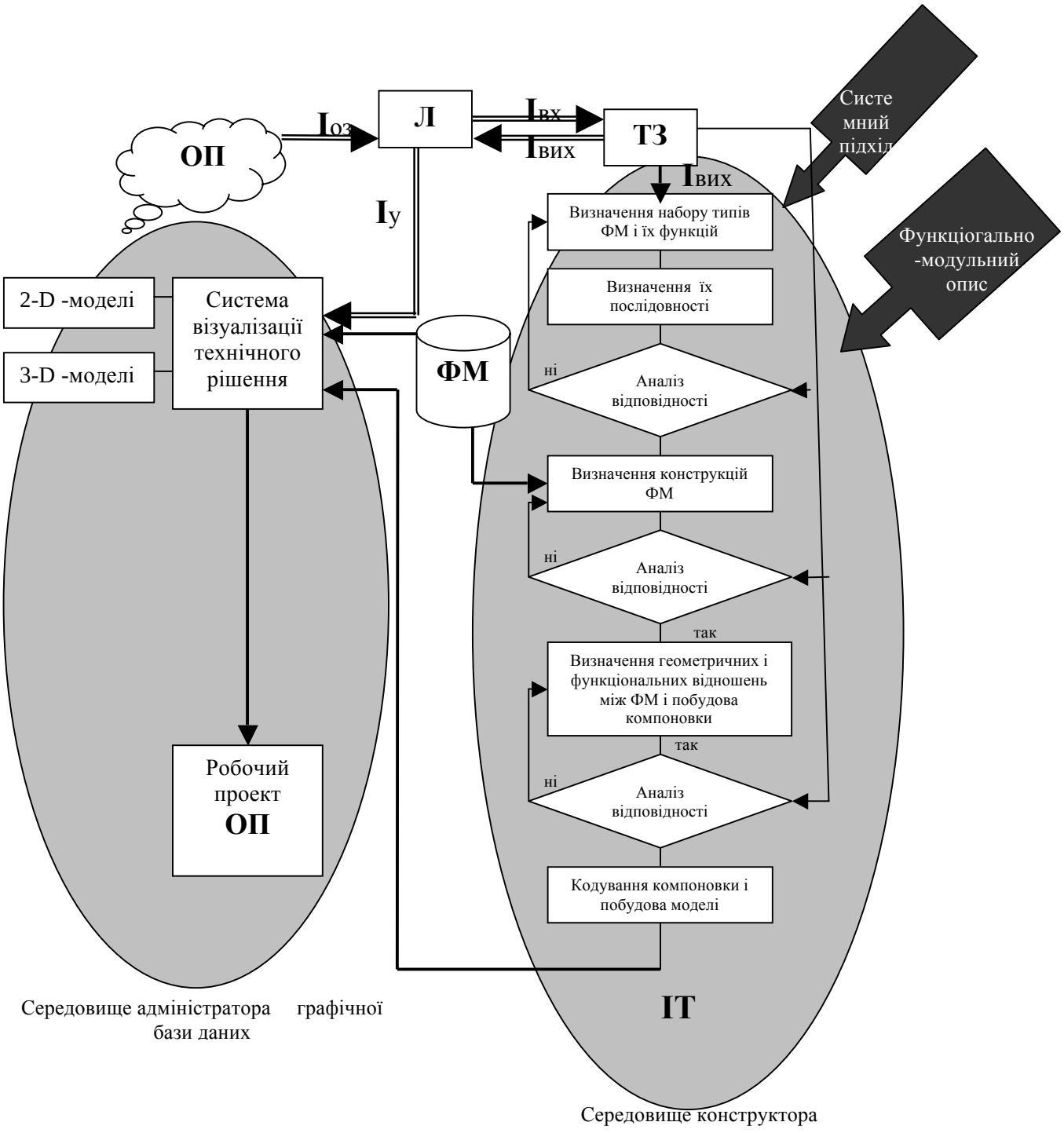


Рис. 2.63. Схема будови інтегрованої САПР технологічного устаткування

Середовище адміністратора графічної бази даних дозволяє створювати і редагувати креслення і геометричні моделі, а також призначене для роботи з ієрархічними графічними базами даних. На жаль, робота більшості САПР зводиться до викреслювання за допомогою комп'ютерних програм вже готового технічного рішення, а процедури отримання цього рішення залишаються за межами роботи системи.

Середовище конструктора забезпечує рішення всього комплексу завдань проектування технологічного устаткування, необхідних для створення функціонально-модульної структури технологічного устаткування шляхом її синтезу, моделювання, аналізу і відбору кращої.

При створенні системи автоматизованого проектування на основі використання інформаційних процедур синтезу функціонально-модульної структури технологічного устаткування із набору функціональних модулів, здійснюються процедури побудови моделей компоновок, їх аналіз і відбір кращих. Це процедури, що використовують типові інформаційні технології оптимізаційного синтезу технічних систем. Ці процедури можуть реалізовуватися на сучасній комп'ютерній техніці.

Структурний синтез розуміється як комбінування можливих компоновок машини із заданого набору функціональних модулів і аналіз їх властивостей. Вихідними даними для синтезу служать множина функціональних модулів і відношення їх сполучення між собою.

Основний напрям розвитку САПР повинен проходити в напрямку зближення у часі процедур синтезу і відбору варіантів, що можливо тільки шляхом включення їх у загальну систему проектування функціонально-модульних об'єктів з долученням процедури моделювання.

Системний підхід до автоматизованого проектування технологічного обладнання шляхом оптимізаційного синтезу його функціонально-модульної структури полягає в виконанні таких правил:

1. Виділити множину елементів, які утворюють структуру технічного об'єкту, та множину зв'язків між ними. В технологічному обладнанні є два види елементів – елементи структури робочого

процесу в машині – функції, що виконують окремі технологічні перетворення і елементи структури самої машини – функціональні модулі. Під функціональним технологічним модулем розуміють у технологічної машини механізм, який здійснює зміну характеристики виробу (форму, розміри, структуру, механічні властивості тощо). В свою чергу, для того, щоб такий модуль міг виконувати свою функцію необхідні також допоміжні функціональні модулі.

2. Створити математичну модель, яка описує зв’язок структури об’єкту із показниками його функціонування, тобто розв’язати основну задачу проектування – визначити залежність між структурою проектованого об’єкту і характеристиками його ефективності. Для цього необхідно розробити систему параметрів, що описують якість компоновки, що дозволить здійснити аналіз впливу структурних факторів на якість машини, порівняти між собою різні компоновки і їх оцінити для вибору кращої.
3. Створити таку модель інтегрованого автоматизованого проектування, що розв’язує проблематику завдань синтезу і оптимізації структури технологічних машин із функціонально закінчених елементів з використанням комп’ютерної техніки і забезпечує взаємодію процедур послідовного комбінаційного синтезу компонувань і їх аналізу з метою дослідження і відбору, а також зближує в часі процедури синтезу і відбору варіантів
4. Створити послідовний ланцюжок взаємодіючих інформаційних процедур проектування. Представляється доцільним удосконалювати технологію проектування в такому напрямі, щоб кожен крок, зроблений від задуму до готового проекту, був інформаційною процедурою над множиною моделей об'єкта проектування. Це створює передумови того, що, починаючи з перших і кінчаючи останніми етапами проекту, в ході проектування вся інформація з результатів одного етапу використовується на наступному. Фактично кожна попередня модель задає додаткові обмеження, які зменшують кількість варіантів, отриманих комбінаторним синтезом на наступному кроці.
5. Для того, щоб не пропустити кращі рішення, в процедуру проектування необхідно ввести інформаційні процедури синтезу із зменшенням потужностей множин, отримуваних на різних етапах синтезу.

РОЗДІЛ 3. Теоретичні засади формалізації опису функціонально-модульної структури пакувальних машин

3.1. Види моделей опису пакувальних машин

ПМ являє собою багатокомпонентну структуру зі складними взаємозв'язками складових елементів. Не дивлячись на велику різноманітність існуючих ПМ, котрі відрізняються між собою виконуваними функціями, компоновками і розмірами, їх об'єднує одна спільна властивість: будь-яку ПМ можна розглядати як систему, що складається із великої кількості впорядкованих і взаємопов'язаних ФМ.

Для проектування ПМ шляхом аналізу і синтезу технологічних і функціональних можливостей ФМ, їх характеристик і допустимих зв'язків між ними, користуються *графічними, символічними* та *аналітичними* моделями опису структури. У першому випадку створення моделі реалізується за допомогою теорії графів, у другому – теорії множин, у третьому – базується на перетворенні графічної та символьної інформації за допомогою матриць [19].

Нехай усі функціональні модулі складають деяку множину *U*, яку можна розкласти на ряд підмножин, об'єднаних за конструктивними або функціональними ознаками, $A = \{a_1, a_2, a_3, \ldots, a_k\}$, $Б = \{б_1, б_2, б_3, \ldots, б_m\}$, $Г = \{г_1, г_2, г_3, \ldots, г_n\}$. Підмножини *A, Б,…, Г* належать множині $U(A \subset U, Б \subset U, Г \subset U$, а елементи підмножин ($a_1, a_2, a_3, \ldots, a_k; б_1, б_2, б_3, \ldots, б_m; г_1, г_2, г_3, \ldots, г_n$) позначають функціональні модулі. Найменування і характеристики ФМ зручно записувати в матрицях. Кожен рядок матриці М – це певна підмножина множини *U*, а стовпці – порядкові номери елементів у підмножині, тобто кожен елемент множини *U* має своє місце *M(i, j)* в матриці *M* (рис. 3.1). ФМ характеризуються такими показниками як продуктивність, надійність, розміри, форма, маса, функціональне призначення і т.д. Ці характеристики, включаючи й кодовані назви модуля, можна записати в матрицях, рівних за розмірами матриці *M*. Наприклад, в матриці M_1 записані кодові назви модулів, у матриці M_2 – їх продуктивності (якщо модуль такої характеристики не має, то $M(i, j)=0$). Таким чином, в декількох матрицях можна записати всі необхідні для проектування характеристики. При чому кожна

матриця описує тільки якусь одну характеристику модулів, кожен з яких має своє визначене і однакове для всіх матриць місце.

$M =$

$а_1$	$а_2$	$а_3$	…	$а_k$
$б_1$	$б_2$	$б_3$	…	$б_m$
…	…	…	…	…
$г_1$	$г_2$	$г_3$	…	$г_n$

;

$M_1 =$

20	30	25	…	10
0	…	…	…	…
…	…	…	…	…
25	35	15	…	5

$M_2 =$

Дозатор *1*	Дозатор 2	Дозатор 3	…	Дозатор *k*
Рукаво-утворювач1	Рукаво-утворювач 2	Рукаво-утворювач 3		Рукаво-утворювач *m*
…	…	…	…	…
Зварні губки 1	Зварні губки 2	Зварні губки 3	…	Зварні губки *n*

Рис. 3.1. Матричний запис найменувань і характеристик модулів: М – матриця номенклатури модулів; $М_1$ – характеристики (продуктивності, уп./хв) модулів; $М_2$ – кодові назви модулів.

Характеристики ФМ можна записати в одній матриці. Такий спосіб є більш зручним, якщо в подальшому застосовувати теорію графів. В такому разі кожна підмножина множини *U* займає певну кількість стовпців матриці (рис. 3.2) і всі характеристики (γ) кожного ФМ будуть розміщені в визначеному стовпці матриці *МЗ*.

Елементи двох множин можуть вступати між собою в бінарні зв'язки, котрі встановлюють відповідність елементів однієї множини елементам іншої. Якщо два модулі можна поєднати між собою, то це можна записати як вираз $а_i$ Х $б_j$, де $а_i$ і $б_j$ – елементи підмножин *А*, *Б*, а *Х* – бінарне співвідношення, яке встановлює відповідність елемента множини *А* елементу іншої множини *Б*. Елемент $а_i$ називають

першою координатою, а елемент $б_j$ – другою координатою впорядкованої пари.

МЗ =

a_1	a_2	a_3	…	a_k	$б_1$	$б_2$	$б_3$	…	$б_m$	…	$г_1$	$г_2$	$г_3$	…	$г_n$
γ_1/a_1	γ_1/a_2	γ_1/a_3	…	γ_1/a_k	$\gamma_1/б_1$	$\gamma_1/б_2$	$\gamma_1/б_3$	…	$\gamma_1/б_m$	…	$\gamma_1/г_1$	$\gamma_1/г_2$	$\gamma_1/г_3$	…	$\gamma_1/г_n$
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
γ_n/a_1	γ_n/a_2	γ_n/a_3	…	γ_n/a_k	$\gamma_n/б_1$	$\gamma_n/б_2$	$\gamma_n/б_3$	…	$\gamma_n/б_m$	…	$\gamma_n/г_1$	$\gamma_n/г_2$	$\gamma_n/г_3$	…	$\gamma_n/г_n$

Рис. 3.2. Узагальнений матричний запис найменувань і характеристик модулів

Взаємозв’язки між модулями можна задавати за допомогою графа. Вершини графа відповідають елементам множин A і $Б$, а дуга, направлена із вершини a_i до $б_j$, означає, що a_i Х $б_j$. Якщо має місце співвідношення a_i Х $б_j$ і $б_j$ Х a_i, то вершини зв’язуються двома протилежно направленими дугами, які можна замінити однією ненаправленою дугою. Порядок приєднання МФ доцільно представити у вигляді орієнтованого графа (рис. 3.3). Таке співвідношення можна виразити і прямокутною матрицею. Її стовпці відповідають першим координатам, а рядки – другим координатам. На перетині *i*-го рядка і *j*-го стовпця ставиться одиниця, якщо виконується умова a_i Х $б_j$, і нуль, якщо умова не виконується. Наприклад, для зв’язків, представлених графом на рис. 3.3, матриця матиме вигляд, як показано на рис. 3.4.

При з’єднанні двох ФМ отримаємо якісно нову конструктивну одиницю. Тоді задача зводиться до знаходження елементів множини *Б*, котрі зв’язані співвідношенням $X=A\times Б$, тобто потрібно знайти перетин по a_i відношення X. Маємо співвідношення $X=A\times Б$. Якщо $a_i \in A$, то перетин по a_i відношення X, позначене $X(a_i)$, є множина $б_j \in Б$, що $(a_i б_j) \in X$. Множина всіх перетинів відношення X називають фактор-множиною множини *Б* по відношенню до X і позначають $Б / X$. У даному прикладі (рис. 3.3), якщо записати під кожним

елементом із A відповідний перетин відношення X, то елементи другого рядка утворять фактор-множину $Б / X$ виду:

$$\left(\begin{Bmatrix} a_1 \\ б_1, б_3 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} a_2 \\ б_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} a_3 \\ б_1, б_2, б_3 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} a_4 \\ б_3 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} a_5 \\ б_2, б_4 \end{Bmatrix}\right).$$

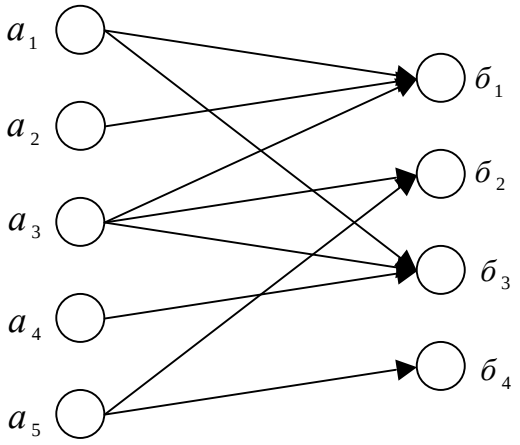


Рис. 3.3. Граф зв'язків між А і Б

$M4=$

	$б_1$	$б_2$	$б_3$	$б_4$
a_1	1	0	1	0
a_2	1	0	0	0
a_3	1	1	1	0
a_4	0	0	1	0
a_5	0	1	0	1

Рис. 3.4. Матричний запис графа зв'язків між А і Б

Зв'язки у множині U відображаються орієнтованим графом з його вершинами, які відповідають елементам цієї множини. Якщо має місце співвідношення $u_i X u_j$ і $u_j X u_i$, то вершини зв'язуються двома протилежно напрямленими дугами, які можна умовно замінити ребром. Співвідношенню $u_i X u_j$ відповідає петля, яка виходить із u_i і входить у цю ж вершину. Граф зв'язків в U, заданий множиною X= $\{(u_1, u_2), (u_1, u_6), (u_2, u_3), (u_2, u_4), (u_2, u_6), (u_3, u_4), (u_4, u_6), (u_6, u_5), (u_5, u_5)\}$, зображено на рис. 3.5.

Отже, комплект модулів можна інтерпретувати як граф, в якому модулі представлені вершинами, а можливість їх поєднання – дугами. Якщо деякий модуль, позначений вершиною u_i, може бути з'єднаний безпосередньо або через якісь інші модулі з модулем, позначеним вершиною u_j, тобто існує шлях, що веде від вершини u_i до вершини u_j, то кажуть, що вершина u_j досяжна із вершини u_i. Тоді $\Gamma_П(u_i)$ є множиною таких вершин u_j, які досяжні із u_i з використанням

шляхів довжини один, тобто $\Gamma_{П}(u_i)$ – множина вершин множини U, для яких в деякому графі G існують дуги u_i, u_j. Множина $\Gamma_{П}[\Gamma_{П}(u_i)]= \Gamma_{П}^{2}(u_i)$ складається з вершин, які досяжні з вершини u_i з використанням шляхів довжини два, а $\Gamma_{П}^{P}(u_i)$ є множиною вершин, які досяжні з вершини u_i з використанням шляхів довжини p. Будь яка вершина графа G, яка досяжна з u_i, повинна бути досяжна з використанням шляху (шляхів) довжини нуль, один, два, …, або p. Тому множину вершин, досяжних із u_i, можна представити у вигляді:

$$R(u_i) =\{u_i\}\cup\Gamma_{П}(u_i)\cup\Gamma_{П}^{2}(u_i)\cup\ldots\cup\Gamma_{П}^{P}(u_i).$$

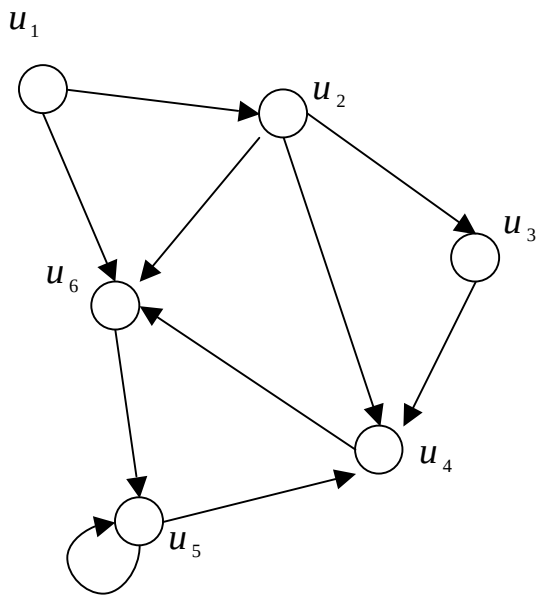


Рис. 3.5. Граф зв’язків у множині U

Таким чином, досяжна множина $R(u_i)$ може бути одержана послідовним виконанням (зліва направо) операцій об’єднання, доки “поточна” множина не стане збільшуватись у розмірах при виконанні чергової операції об’єднання, тобто наступні операції не будуть давати нових членів множині. Кількість об’єднань, які можна виконати, залежить від графа, але очевидно, що число p є меншим за число вершин у графі. Наприклад, досяжну множину для графа, зображеного на рис. 3.5, буде знайдено за допомогою співвідношення:

$$R(u_1) =\{u_1\}\cup\{u_2, u_6\}\cup\{u_3, u_4, u_5, u_6\}\cup\{u_4, u_5, u_6\}=$$
$$\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\}.$$

Матриця досяжностей $R=[V_{ij}]$ визначається наступним чином:

V_{ij}=1, якщо вершина u_j досяжна із вершини u_i,

V_{ij}=0, якщо вершина u_j недосяжна із вершини u_i.

Досяжна множина вершин $R(u_i)$ деякого графа *G*, досяжних із заданої вершини u_i, складається із таких елементів u_j, для яких елемент $R(i,j)$ в матриці досяжностей рівний 1. Діагональні елементи в матриці *R* рівні 1, так як кожна вершина досяжна із себе самої за допомогою шляху довжини нуль. Якщо $u_j \in R(u_i)$, то V_{ij}=1, в протилежному випадку $V_{ij} \neq 1$. Для графа, зображеного на рис. 3.5, матриця досяжностей виглядає, як показано на рис. 3.6.

$R=$

	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
u_1	1	1	1	1	1	1
u_2	0	1	1	1	1	1
u_3	0	0	1	1	1	1
u_4	0	0	0	1	1	1
u_5	0	0	0	0	1	1
u_6	0	0	0	0	0	1

Рис. 3.6. *Матриця досяжностей R*

Якщо в деякому графі *G* вершина u_j досяжна з вершини u_i з використанням деякого шляху довжиною $p = n$, то це означає, що існує принаймні один маршрут, який зв'язує ці вершини. Під маршрутом розуміють таку кінцеву чи безкінечну послідовність $S=(\ldots, E_0, E_1, \ldots, E_n \ldots)$, при якій кожні два сусідніх ребра E_{i-1} і E_i мають спільну кінцеву точку. Якщо в графі немає ребер, котрі передують E_0, то u_0 називають початковою вершиною маршруту *S*, а якщо ребер немає, то наступних після E_{n-1}, то u_n називають кінцевою вершиною. Так, граф, показаний на рис. 3.5 має початкову вершину

u_1, а кінцевої не має. Якщо в маршруті кожне ребро зустрічається не більше одного разу, то його називають ланцюгом. Замкнутий ланцюг називається циклом. В орієнтованих графах рух по маршруту допускається тільки у напрямках, вказаних стрілками. Ребро чи дугу графа можна записати як $E_i(u_{i-1}, u_i)$. Тоді маршрут S можна записати як $S = (u_0, u_1), (u_1, u_2), \ldots, (u_{n-1}, u_n)$, або як послідовність вершин $S = u_0, u_1, u_2, \ldots, u_n$.

Як бачимо, представлені моделі опису структури ПМ, які базуються на елементах теорій графів і множин, можуть бути з успіхом реалізовані при дослідженні довільного набору ФМ.

3.2. Моделювання послідовності виконання елементів технологічної операції пакування

Переважна більшість ПМ для пакування сипких речовин працюють автоматично завдяки наявності у них системи керування, яка забезпечує і контролює злагоджене функціонування ФМ.

Для розробки відповідної програми керування проектант повинен створити модель функціонування машини, яка по суті, являє собою алгоритм її роботи. Тому оптимізаційний синтез ПМ окрім методики генерування варіантів структури ПМ і вибору серед них кращого, повинен передбачати методику синтезу моделі функціонування.

Розглянемо спосіб побудови моделі функціонування. Кожен ФМ машини функціонально є дискретним елементом. Це означає, що технологічна операція пакування реалізується кінцевим числом дій, результат яких фіксується в певні моменти часу і в певних станах ФМ. Крім того, ФМ характеризуються також і безперервними аспектами функціонування, оскільки на ефективності ПМ впливає також і механіка переходів з одного стану в інший. Проте для моделі функціонування ці безперервні властивості модулів значення не мають.

Для опису моделі функціонування введемо вектор-функцію $A(j)$, для якого j – номер такту, розмірність якого співпадає з числом ФМ в машині, а i-та компонента цього вектора є кодом стану i-го ФМ на j-му такті роботи.

Значення вектор-функції A(*j*) на *j*-му такті роботи назвемо *j*-ю проміжною ціллю (коротко *j*-ціллю) процесу пакування. Введенням вектору A(*j*) підкреслюється, що процес пакування має послідовний впорядкований в часі характер.

Перехід від *j*-цілі до (*j*+1)-цілі, який будемо називати *j*-м переходом циклу, полягає в зміні стану хоча б одного ФМ. Якщо A_k^j – *k*-та компонента вектора *A*(*j*), тобто існує значення коду стану *k*-го ФМ в *j*-цілі, то принаймні для одного *k*

$$A_k^j \neq A_k^{j+1} \qquad (3.1)$$

Якщо умова (3.1) виконується тільки для одного *k*, то *j*-й перехід назвемо послідовним. В протилежному випадку, коли умова (3.1) виконується для двох і більше *k*, то *j*-й перехід буде паралельним, оскільки декілька ФМ одночасно змінюють свій стан.

Таким чином, може мати місце послідовно-паралельний процес пакування, якщо він містить хоча б один паралельний перехід.

Розглянемо послідовність побудови моделі функціонування машини для пакування сипких матеріалів.

Отже, компонування машини містить 11 ФМ. Проте при побудові моделі функціонування доцільно розглядати тільки керовані ФМ, тобто ті, які здійснюють переміщення під час функціонування для виконання технологічних переходів.

Приймемо, що код стану ФМ *k* =1, якщо він виконує технолог-гічний перехід, *k* = 0, якщо не виконує.

Нижче позначені ФМ, що в процесі функціонування змінюють свій стан.

M1 – дозатор: в момент дозування сипкої речовини код стану – 0, в момент фасування відміряної дози в пакет код стану – 1;

M2 – пристрій поздовжнього зварювання: в момент зварювання шва пакета код стану – 1, в відведеному положенні код стану – 0;

M3 – пристрій поперечного зварювання: в момент зварювання шва пакета код стану – 1, в відведеному положенні код стану – 0;

M4 – механізм протягування рукава: під час протягування код стану – 1, в відведеному положенні код стану – 0.

M5 – механізм відрізання: в момент відрізання пакету код стану – 1, в відведеному положенні код стану – 0.

Матриця переходів ФМ з одного стану в інший (змін *j*-цілей машини для пакування сипких речовин) зведена в табл. 3.1.

Зауважимо, що для кожного варіанту компонування існує власна матриця станів, що пов’язано зі специфікою конструкції ФМ та кількістю функцій, які вони виконують.

Таблиця 3.1

Матриця змін станів машини для пакування сипких речовин

Технологічний перехід	*j*-ціль	Коди станів функціональних модулів				
		M1	*M2*	*M3*	*M4*	*M5*
Дозування	*A*(1)	1	0	0	1	0
Поздовжнє зварювання	*A*(2)	0	1	1	0	1
Поперечне зварювання	*A*(3)	0	1	1	0	1
Протягування рукава	*A*(4)	1	0	0	1	0
Відрізання	*A*(5)	0	1	1	0	1

3.3. Графічне моделювання послідовності виконання технологічної операції пакування сипких речовин

Відобразити у документації те чи інше компонування ПМ можна декількома способами: посиланням на відомий тип компонування, посиланням на конкретну модель ПМ, за допомогою ескізного зображення компонування. Проте у зв’язку з ростом великої різноманітності компонувань ПМ, виникла необхідність в їх коротких записах, котрі могли б служити мовою і інструментом дослідження. Для цього коротке позначення компонування повинно розкривати його структуру, дозволяти судити про розміщення функціональних модулів в просторі і надавати можливість використання того чи іншого математичного апарату дослідження. Всім цим вимогам задовольняє позначення функціональних модулів у складі ПМ з допомогою структурних формул.

Структурна формула компонування – це визначення послідовності символів, що позначають елементи компонування і розкривають координатну приналежність і спосіб поєднання цих елементів [3].

В структурних формулах застосовується система позначення осей координат ISO. Особливість її в тому, що вісь координат Z приймають завжди паралельно осі головного руху ТМ, незалежно від того, як вона розташована – вертикально чи горизонтально. За

додатній напрямок осі приймають напрямок від заготовки до інструмента. Вісь X завжди горизонтальна. Додаткові рухи, паралельні осям X, Y, Z позначають відповідно u, v, w (другорядні) і p, q, r (третьої черги). Обертальні рухи навколо осей X, Y, Z позначають відповідно буквами a, b, c , а додаткові – d і e. Додатні напрямки обертальних рухів інструменту +a, +b, +c відповідають напрямку правого гвинта при його переміщенні вздовж осей +X, +Y, +Z .

Основне правило розташування блоків: від заготовки до інструмента. Індексами h і v позначають відповідно горизонтальну і вертикальну вісь, горизонтальну вісь можна позначити підкресленням знака блоку (Z або C). Дробовий індекс h/v при знаку блока проставляють, якщо його вісь поворотна. Якщо вісь має тільки два крайніх положення, то позначають v, h. Знаки обертальних дублюючих рухів переважно застосовують: навколо вертикальної осі d, горизонтальної – e. Блоки, що виконують одночасно два рухи, наприклад, поступальний і обертальний, записують із похилою дробовою рискою (Z/C). Це відноситься і до блоків, що переміщаються під кутом (Y/Z – ближче до осі Z).

При послідовному сполученні блоків використовується знак “×”, що для спрощення запису опускається, або замінюється крапкою “·”, паралельно сполучені блоки записують у дужках із знаками “+”, якщо ж вони однакові, то замість дужок число блоків записують цифрою перед відповідним позначенням.

Структурні формули компонувань можуть мати різноманітні ступені уточнення: K_1 – координатна, K_2 – базова, K_3 – конструкційна.

Перший етап уточнення компонувань (K_1) – це етап, коли у формулі вказані склад і спосіб спряження блоків, а за допомогою індексів v і h уточнюють положення осей координат.

На другому етапі уточнення (K_2) вказують базовий тип, до якого відноситься компоновка. Для цього відповідні умовні індекси проставляють біля знаку стаціонарного блоку, від виконання якого тип компонування залежить в найбільшій мірі.

На третьому етапі (K_3) розкривають конструкційну побудову компонування, після чого формула набуває необхідної однозначності. Для цього знаки блоків забезпечуються індексами , які позначають конструкційні варіанти блоків чи положення направляючих, так як і ті, і інші зв’язані з конструкційною будовою технологічної машини.

Для вирішення задач компонування ТМ необхідно залучити алгебру логіки і теорію множин, що дозволяють розглядати компонування як упорядковану множину блоків, а різноманітні сполучення блоків (ФМ) – як логічні відношення елементів цієї множини, серед яких кон'юнкція – логічне множення (функція "І") відповідає послідовному сполученню елементів (блоків), а диз'юнкція – логічне додавання (функція "АБО") – паралельному сполученню.

Стосовно до блоків компонувань ТМ кон'юнкція (знаки $\wedge$ або $\cap$ або знак множення – крапка , що як і в алгебрі може бути пропущена) полягає в тому, що для одержання складного переміщення кінцевого блоку в системі координат X – Y – Z ТМ потрібне переміщення одного блока за напрямом X, іншого – за Y, третього – за Z, що досягається послідовним сполученням блоків.

Диз'юнкція (знаки $\vee$ або $\cup$, або знак додавання "+") відповідає паралельному сполученню елементів (блоків), при якому дія функції, наприклад двох елементів, виявляється за умови дії одного з них, першого АБО, другого АБО при дії обох разом.

У тих випадках, коли, наприклад, два елементи, об'єднані диз'юнкцією, вступають у відношення кон'юнкції до третього, в алгебрі логіки допускають дужки, наприклад, $(X + Y) \cdot Z$, що стосовно до блоків компонування може означати, що блоки X і Y, порізно послідовно сполучені з блоком Z, між собою паралельні, тобто можуть переміщатися одночасно або кожний окремо.

Математичний характер структурних формул може бути підтверджений можливістю застосування до них алгебраїчних законів:

1) комутативний (переміщувальний) – складний формотвірний рух не порушується при різноманітних сполученнях його елементів, тобто типу:

$$XYZ = XYZ = \ldots$$

2) дистрибутивний (розподільний) – дозволяє об´єднувати блоки, що чинять однакові рухи, або навпаки, – розділяти, якщо синхронний рух виявиться неприйнятним, тобто типу:

$$XY + XZ = X(Y + Z);$$

3) асоціативний (сполучний) – об'єднання рухів в одному блоці, наприклад, поступального руху з обертальним, або двох поступальних рухів, типу:

$$(XY)Z = X(YZ);$$

4) ідемпотентності – дозволяє дублювати рух вздовж однієї осі шляхом розподілу загального переміщення між двома блоками, сполученими послідовно, тобто типу:

$$XX = X;$$

5) специфічний де Моргана – установлює можливість переходу від кон'юнкції до диз'юнкції і навпаки, що означає можливість переходу від послідовного сполучення блоків до паралельного [23].

Важливою властивістю структури формул є можливість оперувати ними як множинами і як елементами більш великих множин. Відповідно до різноманітних щаблів конкретизації структурних формул конструкційне компонування K_3 є одним з елементів базового компонування K_2, а остання – елементом множини, що являє собою координатне компонування K_1:

$$K_3 \subset K_2 \subset K_2.$$

В описаних структурних формулах поряд із раніше прийнятими позначеннями використовують ще одну функцію алгебри логіки – інверсії або заперечення (функції НІ). Функцію позначають рискою над знаком, що заперечується і стосовно до множини блоків, обмежена визначеним складом, вона являє собою доповнення до даного блоку до повного складу.

Наприклад, $\overline{0}$ ("не 0") означає, що всі блоки, що входять до складу компонування, рухомі. Якщо при цьому склад блоків визначається множиною M {$\overline{0}$, X, Y, Z, C}, то блоком 0 можуть бути X, Y, Z і C, тобто $\overline{0}$ = X + Y + Z + C, аналогічно $\overline{X}$ = 0 + Y + Z + C і т.д.

Узагальнені формули дозволяють робити такі математичні операції: розгортання узагальнених формул (множин) у конкретні формули компонувань; відповідності конкретної формули узагальненій (операція, обернена попередній); додавання і перетин множин.

Наприклад, узагальнена формула $X0\overline{XX}C$ на дві конкретні формули [3]:

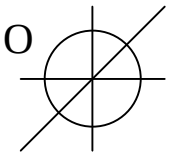
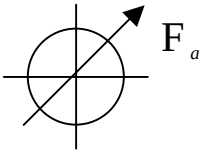
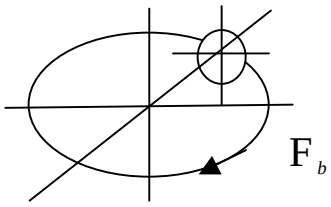
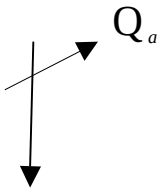
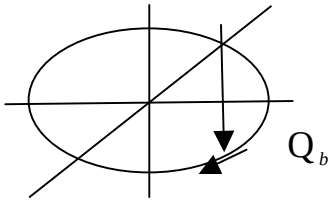
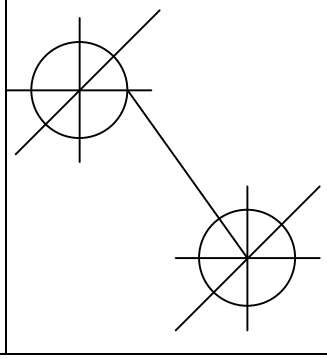
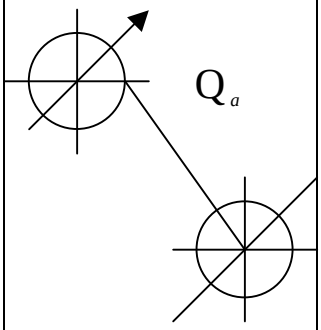
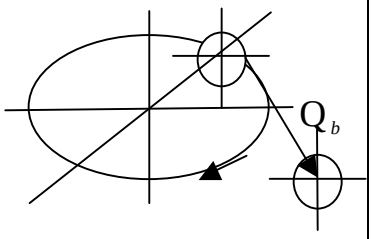
$$X0\overline{XX}C = X0YZC + X0ZYC.$$

Формалізація структури ПМ у вигляді структурної формули є основою для створення її структурної схеми, котра наочно відобра-

жає спосіб функціонування кожного ФМ у складі ПМ. Умовні позначення основних операторів структурних схем наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Умовні позначення основних операторів структурних схем

Найменування діючого оператора	Графічне зображення	Графічне зображення відносного переміщення (операторів переадресації)	
		Прямолінійне	Орбітальне
Об'єкт, над яким виконується операція			
Оператор переробки			
Оператор вводу і виводу об'єкту			

Для побудови моделі функціонування ПМ потрібно ввести відповідні позначення. Механізм розмотування та подачі пакувального матеріалу у складі рулонотримача та направляючих роликів позначимо d_h. Дозатор позначимо через P. Оскільки він дискретно обертається навколо своєї осі, то його характеризує оператор орбітального руху p_b. Механізм поздовжнього зварювання представляє собою рухомі зварні губки із вмонтованим датувальним пристроєм, який витискає дату виготовлення під час утворення шва. Даний механізм позначимо GD, а його рух – оператором p_a. Губки поперечного зварювання у розімкнутому стані переміщуються вгору на крок, рівний висоті пакета, після чого змикаються, захопивши

рукав, і протягують його вниз, одночасно зварюючи при цьому верх нижнього пакету і дно верхнього і розрізаючи їх між собою. Цей механізм матиме позначення F.

Виходячи із вищевказаного, складемо структурну формулу ПМ:

$$d_h\ Pp_b GDp_a\ OZFp_a\ XY$$

На рис. 3.7 представлено наведену структурну формулу разом з поясненням до кожного елементу.

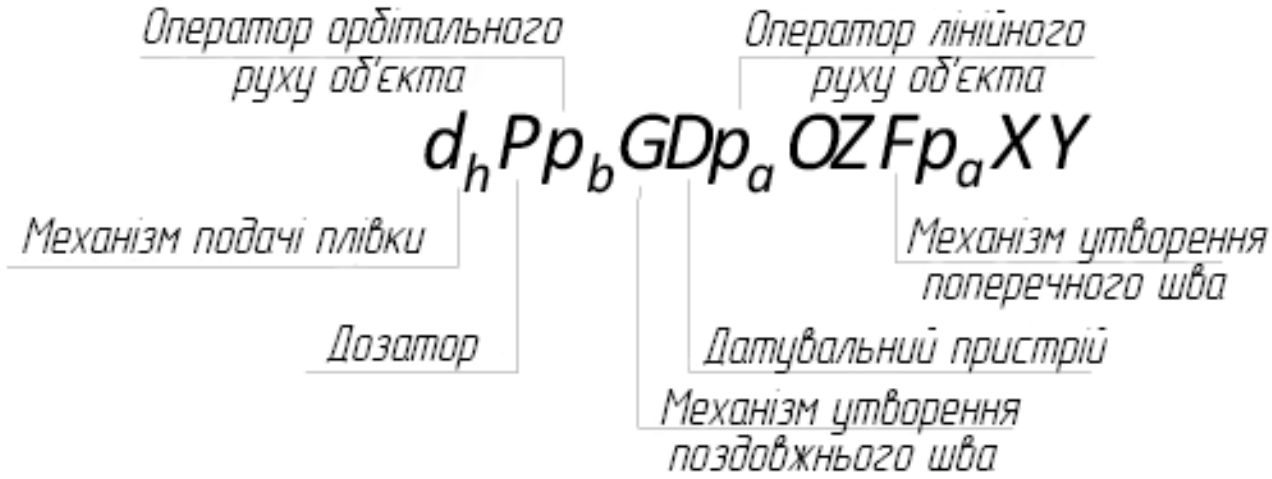


Рис. 3.7. Структурна формула машини для пакування сипких речовин

На основі структурної формули побудуємо структурну схему машини (рис. 3.8)

На основі запропонованого методу моделювання функціонування машини для пакування сипких речовин можемо здійснити синтез компонувань ПМ даного призначення, описуючи їх у вигляді сукупності ФМ (табл. 3.3) та їх блоків (табл. 3.4).

З наведених схем видно, що зв'язок між БФМ є жорстким, тобто переміщення виробу з однієї робочої позицію на іншу відбувається відповідно до темпу роботи ПМ. Очевидно, що якщо один із ФМ вийде з ладу, то це спричинить зупинку роботи всієї машини.

Для усунення такої проблеми пропонується поєднувати БФМ між собою через гнучкий зв'язок, який забезпечують проміжні накопичувачі. В такому разі під час відмови пакувального БФМ дозувально-фасувальний БФМ буде заповнювати накопичувач відміряними дозатором дозами, в протилежному випадку будуть

використовуватись для запаковування дози із накопичувача. Аналогічним чином можна нагромаджувати готові упаковки для здійснення над ними додаткових дій.

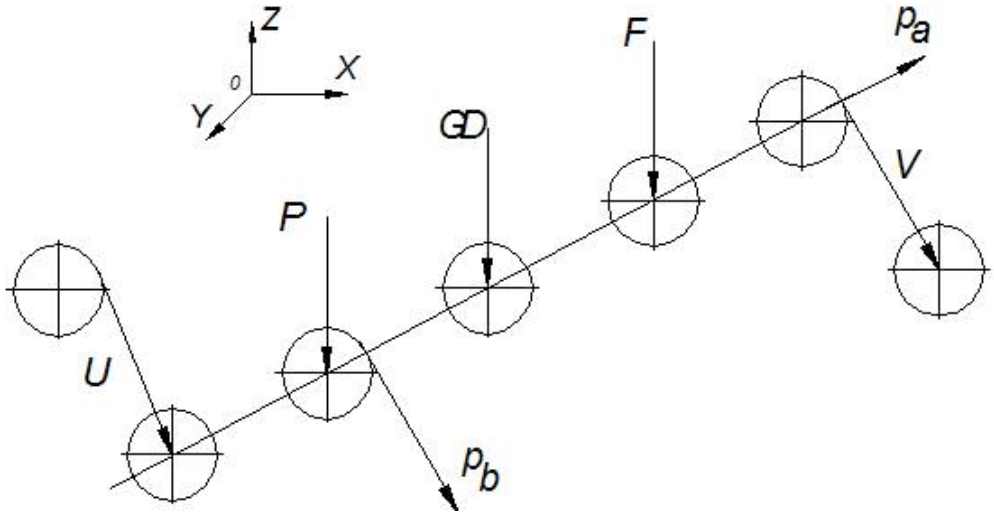


Рис. 3.8. Структурна схема машини для пакування сипких речовин

Поєднання БФМ через гнучкий зв'язок схематично виглядатиме таким чином (табл. 3.3 – 3.5).

3.4. Моделювання структури машин для пакування сипких речовин

Проектування ПМ виступає як комплексна задача, в якій у складному взаємозв'язку переплітаються завдання синтезу, моделювання, оптимізації. В загальному випадку система проектування включає в себе два блоки:

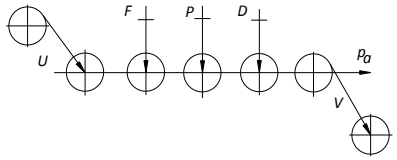
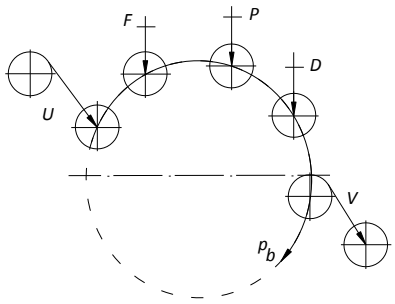
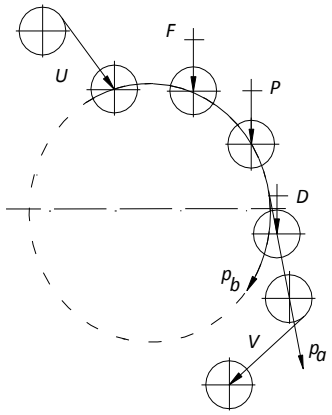
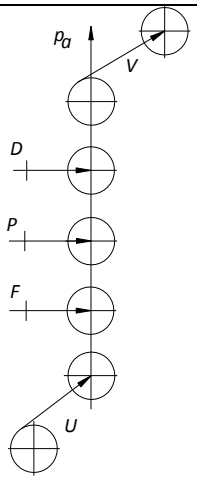
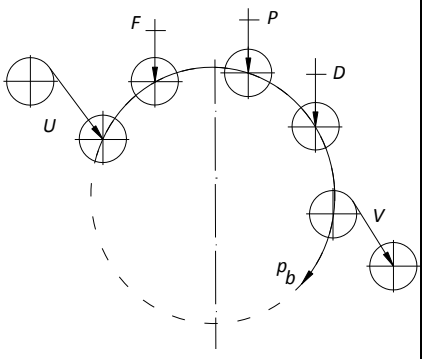
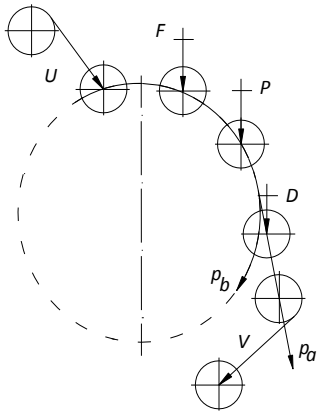
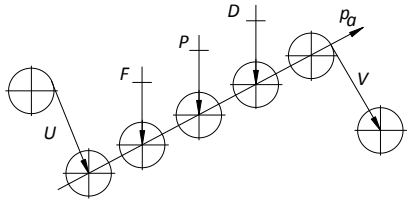
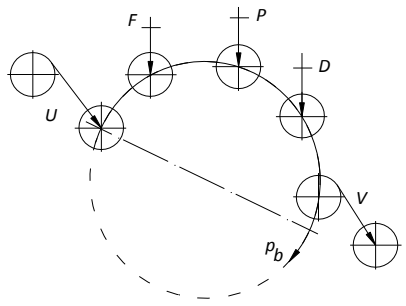
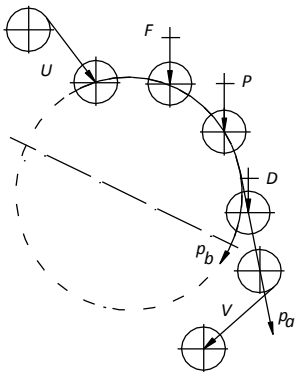
1. Оптимізаційний синтез структури машини.
2. Візуалізація результатів оптимізації у вигляді 3D-моделі машини.

Проблема створення ефективної методології опису і оцінки структури ПМ за різними характеристиками стає все більш актуальною і вимагає системного підходу до аналізу машини.

Системний підхід до розгляду ПМ як об'єкта проектування передбачає побудову концептуальної моделі, тобто такої абстрактної моделі, яка відображає структуру об'єкта та зв'язки між його елементами.

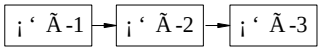
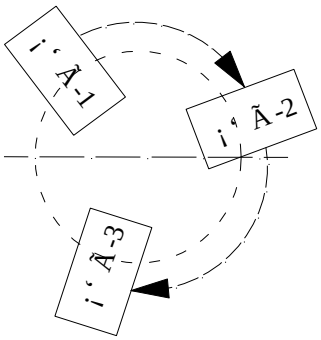
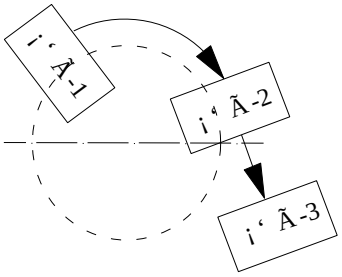
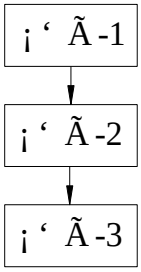
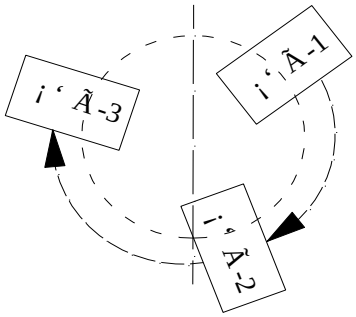
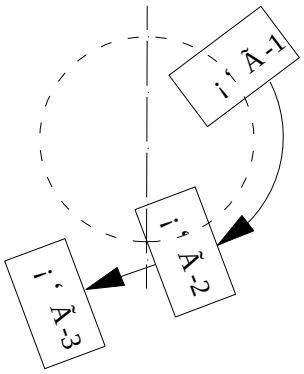
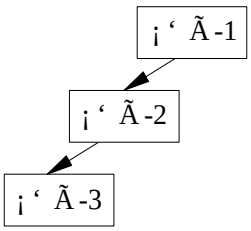
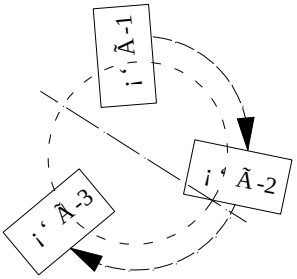
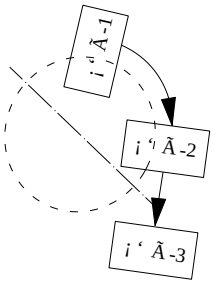
Таблиця 3.3

Варіанти компонувань функціональних модулів машин для пакування сипких речовин

Напря	Лінійна	Кругова	Комбінована
Горизонтальна			
Вертикальна			
Нахилена			

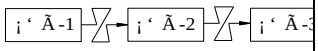
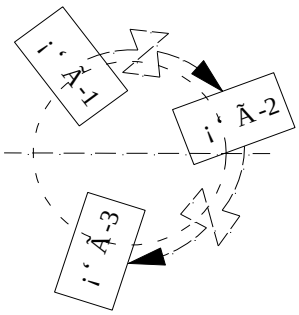
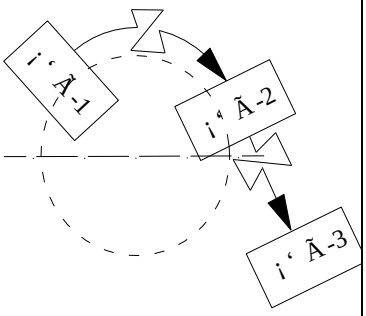
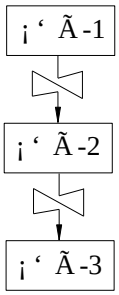
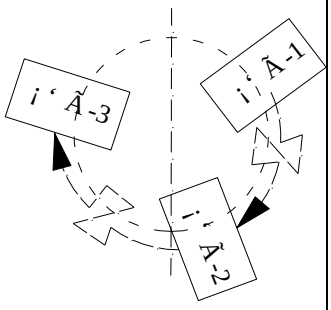
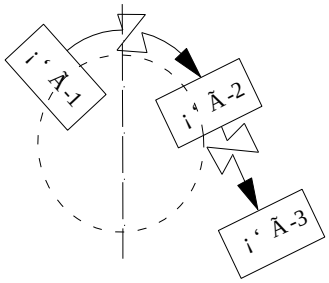
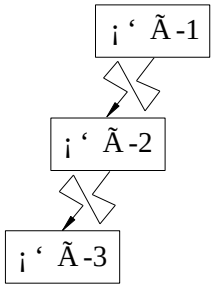
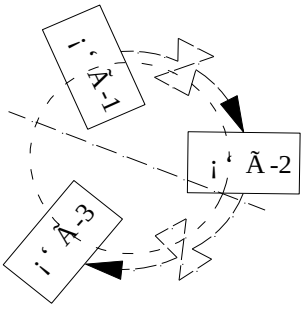
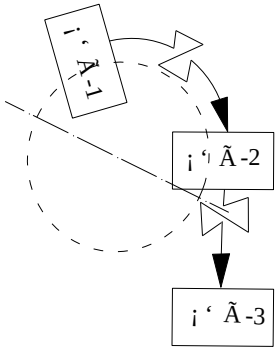
Таблиця 3.4

Варіанти компонувань блоків функціональних модулів машин для пакування сипких речовин

Напрям розташу-вання осі	Лінійна	Кругова	Комбінована
Горизонтальна			
Вертикальна			
Нахилена			

Таблиця 3.5

Варіанти компонувань блоків функціональних модулів пакувальних автоматів з гнучким зв'язком

Напрям розташування осі	Лінійна	Кругова	Комбінована
Горизонтальна			
Вертикальна			
Нахилена			

При створенні цієї моделі враховується два аспекти опису ПМ:

• *функціональний опис,* елементами якого є множина простих функцій F та множина відношень Q між ними, які визначають принципи функціонування ПМ;

• *структурний опис,* елементами якого є ФМ $x \in X$ та зв'язки R між ними, які створюють компонування ПМ.

Функціональний опис є більш загальним, оскільки кожна технічна функція може бути реалізована багатьма конструктивними варіантами ФМ. Разом із тим, кожен ФМ реалізує лише ту функцію, для якої він був створений. Звідси випливає принцип передування функціонального проектування ПМ щодо структурного [35].

На рис. 3.9 зображений загальний алгоритм здійснення оптимізаційного синтезу ПМ. Даний алгоритм базується на засадах методології SADT (з англ. “Structured Analysis & Design Technique” – методологія структурного аналізу і проектування), що передбачає побудову трьох рівнів концептуальної моделі: функціональної (*f*-моделі), функціонально-структурної (*fs*-моделі), структурної (*s*-моделі) [10, 17].

Кожен з наведених рівнів побудови концептуальної моделі передбачає виконання ряду послідовних етапів.

На першому рівні відбувається виділення найбільш важливої функції ПМ, яка називається головною службовою функцією і, як правило, відповідає первинній меті створення ПМ [36]. Після цього необхідно здійснити декомпозицію службової функції ПМ на основні та допоміжні.

На другому рівні здійснюється підбір технічних засобів − ФМ − для реалізації простих функції.

На третьому рівні проводиться структурна оптимізація ПМ в цілому.

Отже, будь-яка корисна дія об’єкта виражається через виконувану ним функцію. Його функціональний опис здійснюється у вигляді ***f*-моделі**.

Побудова *f*-моделі об’єкту – одна з основних процедур методології SADT. Вона полягає в декомпозиції службової функції машини, тобто в послідовному виведенні функцій певного рівня з функцій попереднього, починаючи з головної, та встановлення зв’язків між ними. На першому рівні декомпозиції службова функція розглядається як результат спільної дії декількох основних функцій. Основні функції в свою чергу розбивають на допоміжні, які їх реалізують. Декомпозиція певної функції по рівнях *f*-моделі здійснюється доти, поки вона не розпадеться на функції, для здійснення яких стане очевидним використання певного технічного засобу [34].

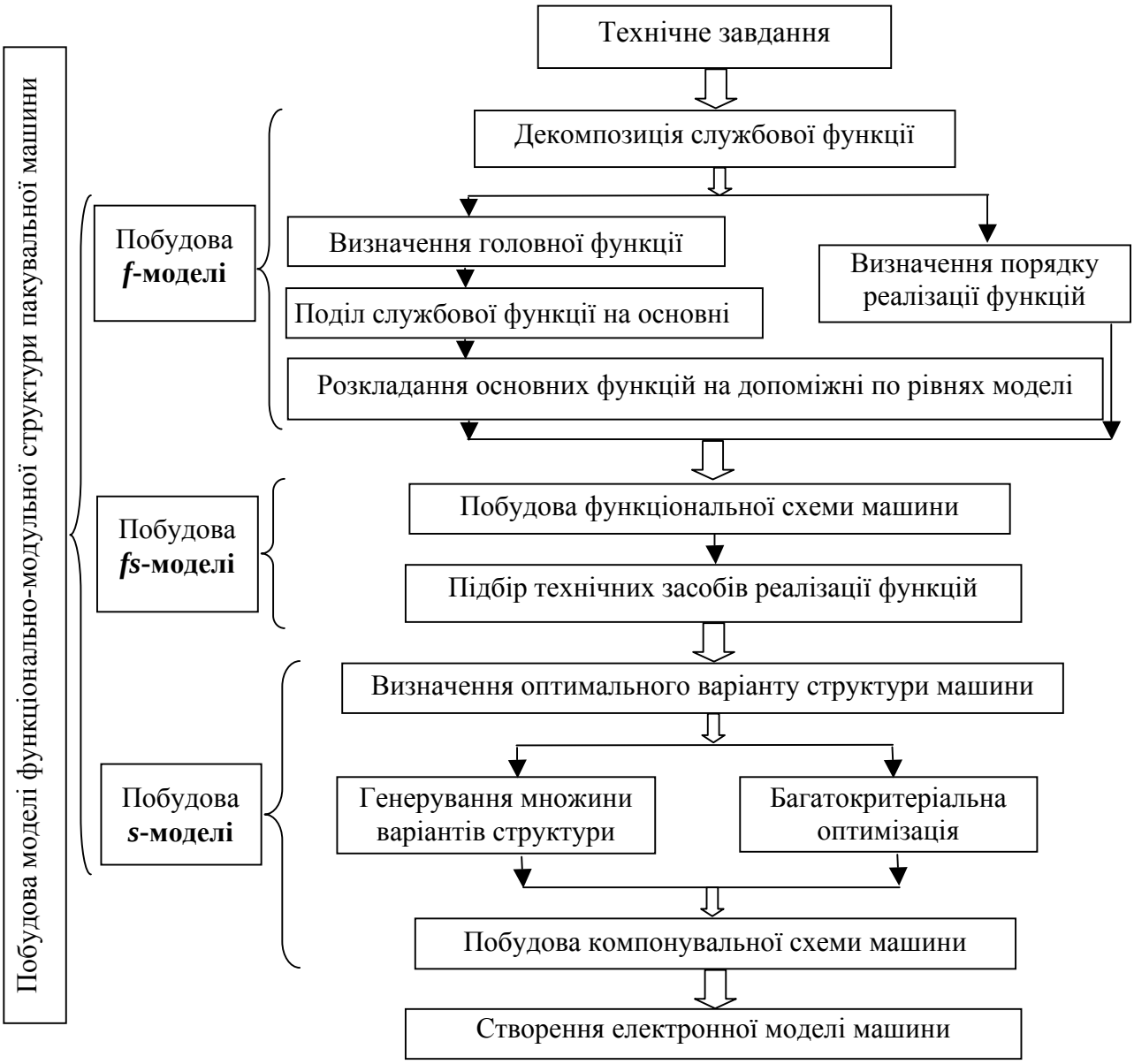


Рис. 3.9. Алгоритм здійснення оптимізаційного синтезу пакувальної машини

Граф декомпозиції службової функції машини для пакування сипких речовин – пакування продукту в плівкові пакети – зображений на рис. 3.10. Він є основою для побудови *f*-моделі, основними робочими елементами якої є діаграми. Кожна SADT-діаграма містить блоки і дуги. Блоки відображають функції різних рівнів складності. Дуги зв’язують блоки разом та відображають взаємозв’язки та відношення підпорядкування між ними.

Рис. 3.10. Схема декомпозиції службової функції машини для пакування сипких речовин

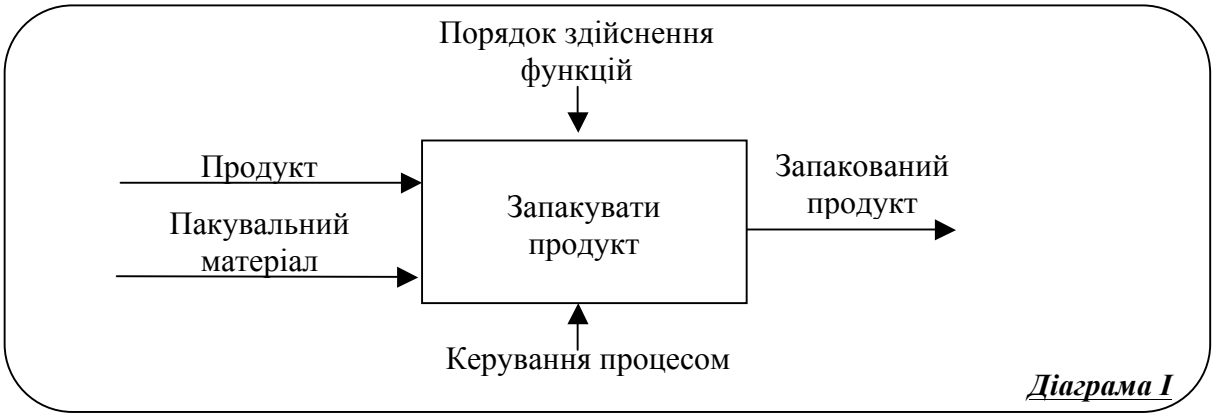
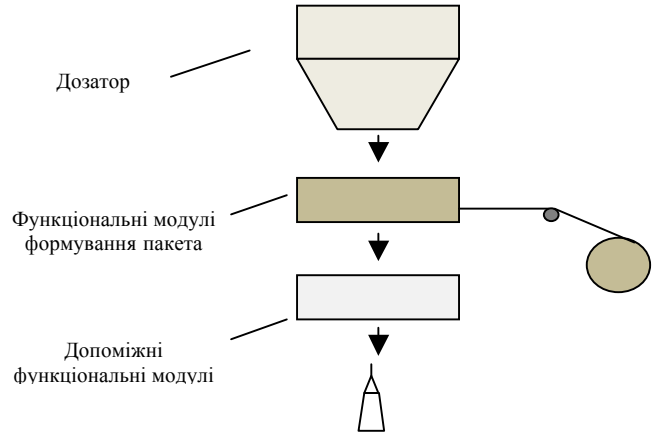


Рис. 3.11. SADT-модель технологічної операції пакування сипких речовин (діаграми 1, 2)

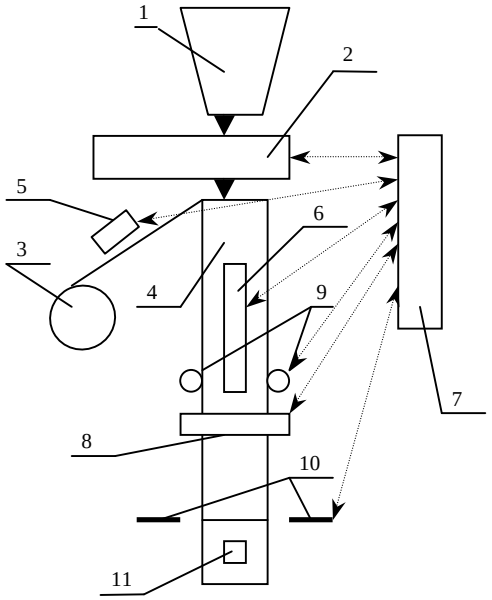
Рис. 3.12. SADT-модель технологічної операції пакування сипких речовин (діаграма 3)

Опис SADT-моделі організований у вигляді ієрархії взаємопов'язаних діаграм. Вершина цієї структури є найзагальнішим описом системи, а її основа складається з більш деталізованих описів.

Користуючись схемою, зображеною на рис. 3.10, побудуємо відповідну їй SADT-модель (рис. 3.11, 3.12). SADT-модель, в свою чергу, є основою для побудови проміжної – ***fs*-моделі**, що представляється у вигляді функціонально-структурної схеми машини, на якій умовно позначені відповідним чином впорядковані та взаємозв'язані ФМ. На рис. 3.13 показано узагальнену *fs*-модель машини для пакування сипких речовин, яка відображає усі типові ФМ, необхідні для виконання технологічної операції пакування.



а



1 – бункер;
2 – дозатор;
3 – механізм подачі плівки;
4 – рукавоутворювач;
5 – пристрій центрування пакувального матеріалу;
6 – пристрій поздовжнього зварювання;
7 – блок керування;
8 – пристрій поперечного зварювання;
9 – механізм протягування рукава;
10 – механізм відрізання;
11 – датувальний пристрій

б

Рис. 3.13. Узагальнена функціонально (а) і структурна (б) схема (*fs*-модель) машини для пакування сипких речовин

Перехід від функціонального до структурного опису об’єкта, тобто побудова **s-моделі** ПМ, є найбільш складним етапом проектування. Пояснюється це тим, що кожній функції здебільшого відповідає декілька типорозмірів ФМ, тому основною задачею при створенні майбутньої конструкції машини є виділення раціонального набору ФМ, які зможуть використовуватися для формування її структури. Для виконання цього завдання необхідно здійснити оптимізаційний синтез компонування машини.

РОЗДІЛ 4. Засади оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури машин для пакування сипких речовин

4.1. Структура основних процедур оптимізаційного синтезу

Здійснення оптимізаційного синтезу компонувань ПМ передбачає послідовне виконання ряду процедур. Кожна з них полягає у розв'язанні певної локальної задачі, результати виконання якої є початковими даними для наступної.

Розглянемо їх детально.

1. Формалізація початкових даних.

Як вже зазначалось, машина для пакування сипких речовин як об'єкт проектування розглядається в двох аспектах: як множина функцій, одержаних в результаті декомпозиції службової функції:

$$F = \{ f_1,\ f_2,\ f_3, \ldots, f_n \},$$

що рівна множині виконуваних машиною технологічних переходів:

$$M = \{ m_1, m_2, m_3, \ldots, m_n \},$$

так і множина функціональних модулів для реалізації цих функцій:

$$X = \{ x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n \}.$$

Один і той же технологічний перехід m_k може виконуватись декількома різними типорозмірами ФМ:

$$E_k = \{ x_{k1},\ x_{k2},\ x_{k3}, \ldots,\ x_{kn} \},$$

тому для машини в цілому існує деяка множина E функціональних модулів, що можуть входити до її складу:

$$E = \{ E_1,\ E_2,\ E_3, \ldots, E_i \},$$

які поєднуючись між собою за певними залежностями (функціональними зв'язками), утворюють множину варіантів структури рівну:

$$N = X_1 \times X_2 \times X_3 \times \ldots \times X_j.$$

Реалізація службової функції ПМ S (технологічної операції пакування) можлива за умови виконання усіх функцій (технологічних переходів), що нею передбачені:

$$F^{(n)} = f_1 \wedge f_2 \wedge f_3 \wedge \ldots \wedge f_i,\ S \leftrightarrow F^{(n)};$$

$$M^{(n)} = m_1 \wedge m_2 \wedge m_3 \wedge \ldots \wedge m_n,\ F^{(n)} \leftrightarrow M^{(n)}.$$

Це вимагає використання відповідних технічних засобів (ФМ), які формують структуру машини:

$$X^{(n)} = x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge \ldots \wedge x_n,$$

причому один і той же технологічний перехід у складі машини може виконувати лише один із типорозмірів ФМ:

$$E^{(n)} = x_{k1} \vee x_{k2} \vee x_{k3} \vee \ldots \vee x_{kn},$$

тоді

$$S : M^{(n)} \times X_i^{(n)} \rightarrow N^{(i)} = (x_{11} \vee x_{12} \vee x_{13} \vee \ldots \vee x_{1n}) \wedge$$
$$(x_{21} \vee x_{22} \vee x_{23} \vee \ldots \vee x_{2n}) \wedge (x_{31} \vee x_{32} \vee x_{33} \vee \ldots \vee x_{3n}) \wedge \ldots \wedge$$
$$\wedge (x_{k1} \vee x_{k2} \vee x_{k3} \vee \ldots \vee x_{kn}).$$

Оскільки

$$\forall(x_i \in X^{(n)})\exists(f_i \in F^{(i)}) \rightarrow \exists(x_{kn} \in E^{(n)})\exists(f_i \in F^{(i)}),$$

то

$$\exists(x_{kn} \in E^{(n)})\exists(f_i \in F^{(i)}) \sim \exists(x_{kn} \in E^{(n)})\exists(m_i \in M^{(n)}).$$

Однак з врахуванням взаємозамінності ФМ:

$$\exists(x_{ki} \in X_j^{(k)})\exists(m_k \in M^{(n)}) \neg \exists(x_{kn} \in X_j^{(k)})\exists(m_k \in M^{(n)}).$$

На рис. 4.1. зображено узагальнений граф логічних зв’язків між типовими ФМ машин для пакування сипких речовин.

Формалізоване представлення даного графа виражається таким чином:

$$S : m_1 (x_{11} \vee x_{12}) \wedge m_2 (x_{21} \vee x_{22} \vee x_{23} \vee x_{24} \vee x_{25} \vee x_{26}) \wedge$$
$$\wedge m_3 (x_{31} \vee x_{32} \vee x_{33} \vee x_{34} \vee x_{35} \vee x_{36}) \wedge m_4 (x_{41} \vee x_{42} \vee x_{43} \vee x_{44}) \wedge$$
$$\wedge m_5 (x_{51} \vee x_{52} \vee x_{53} \vee x_{54} \vee x_{55}) \wedge m_6 (x_{61} \vee x_{62} \vee x_{63}) \wedge m_7 (x_{71} \vee x_{72} \vee x_{73}) \wedge$$
$$\wedge m_8 (x_{81} \vee x_{82} \vee x_{83} \vee x_{84} \vee x_{85} \vee x_{86} \vee x_{87} \vee x_{88}) \wedge m_9 (x_{91} \vee x_{92} \vee x_{93} \vee x_{94} \vee x_{95}) \wedge$$
$$\wedge m_{10} (x_{101} \vee x_{102}) \wedge m_{11}(x_{111} \vee x_{112} \vee x_{113}).$$

2. Вибір критеріїв оптимальності.

Кожен ФМ характеризується певними техніко-економічними показниками, які визначають ефективність його роботи:

$$x_{in} : \langle p_1, p_2, \ldots, p_n \rangle,$$

а тому можуть використовуватись як критерії оптимальності для здійснення оцінки якості загальної структури ПМ:

$$x_{in} : \langle p_1, p_2, \ldots, p_n \rangle \rightarrow X_i : \langle p_1, p_2, \ldots, p_n \rangle$$

Вибір параметрів, за якими будуть оцінюватись ФМ та ПМ в цілому залежить від цілей проектування.

3. Формування бази даних.

На даному етапі створюється перелік типових ФМ, що можуть входити до складу ПМ заданого призначення, яким присвоюються значення критеріїв оптимальності. Ці значення можуть бути

заздалегідь відомі, або визначені шляхом експериментального дослідження.

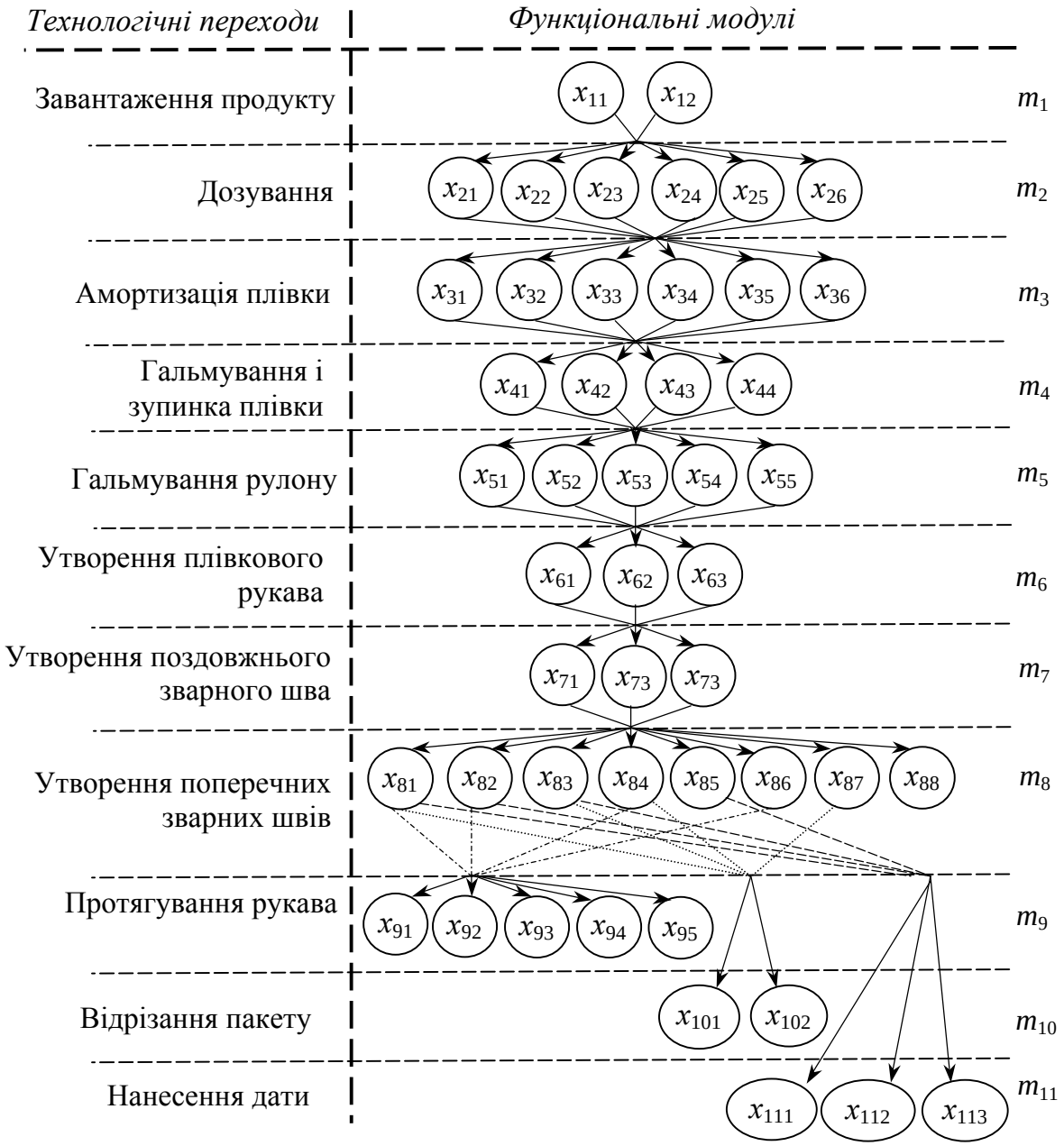


Рис. 4.1. Узагальнений граф логічних зв'язків між типовими функціональними модулями машин для пакування сипких речовин

4. Формулювання постановки задачі оптимізації.

Як правило, однокритеріальну задачу оптимізації можна представити у вигляді:

$$\begin{cases} F_1(X) = p_1 \to \max; \\ p_2 \le p_{2\,зад}. \end{cases} \tag{4.1}$$

або

$$\begin{cases} F_2(X) = p_2 \to \min; \\ p_1 \geq p_{1зад}. \end{cases} \quad (4.2)$$

Тобто, в першому варіанті постановки приймається, що технічний параметр p_1 максимізується, а економічний параметр p_2 задається у вигляді граничної умови, а у другій постановці навпаки: економічний параметр максимізується, а технічний параметр введений як гранична умова [29].

Задача багатокритеріальної оптимізації формулюється таким чином:

$$F(X) = (f_1(X), f_2(X),..., f_S(X)) \to \max(\min),$$

тобто прийняті до розгляду критерії оптимальності об'єднується в один інтегральний критерій та вказується напрям екстремуму.

5. Синтез альтернативних варіантів структури ПМ (знаходження ОДР задачі оптимізації).

Формування варіантів структур відбувається за певним алгоритмом шляхом комбінування різних типорозмірів ФМ між собою відповідно до порядку виконання функцій (технологічних переходів), необхідних для здійснення технологічної операції пакування. Специфіка генерування структур ПМ залежить від методу, який застосовують для реалізації даної процедури, однак він повинен передбачати раціональне поєднання ФМ, яке не суперечить принципу функціонування ПМ.

Розглянемо випадок, коли варіанти структури ПМ можна сформувати із деякої множини ФМ E, що розбита на підмножини за функціональним призначенням (рис. 4.2).

$$E = \bigcup_{i=1}^{3} E_i = \{x | x_{1n} \in E_1 \wedge x_{2n} \in E_2 \wedge x_{3n} \in E_3\}.$$

В даному випадку кількість варіантів структури ПМ X становитиме:

$$N = 4 \cdot 2 \cdot 3 = 24,$$

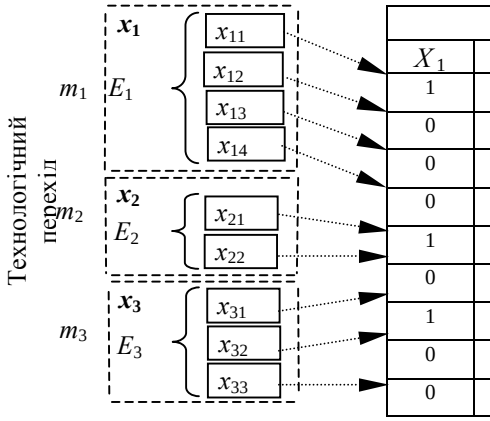
де 4, 2, 3 – число варіантів конструкції (типорозмірів) 1-го, 2-го та 3-го ФМ.

6) Пошук оптимального розв'язку, тобто такого варіанту компонування ПМ, який найбільшою мірою задовольняє умові задачі. Ця процедура полягає у відсіюванні неперспективних варіантів в такій послідовності (рис. 4.3) [72]. На всю множину варіантів

структури ПМ N, отриманих під час генерування, накладають обмеження за критеріями оптимальності p_1 та p_2:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} p_{1i} \cdot x_i \geq p_1, \\ x_i \in X_j,\ i, j = \overline{1,n} \end{cases}, \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^{n} p_{2i} \cdot x_i \leq p_2, \\ x_i \in X_j,\ i, j = \overline{1,n} \end{cases};$$

в результаті чого отримують множину N', з якої поступово виключають недомінуючі розв'язки, покроково звужуючи простір пошуку до підмножини пріоритетних варіантів X', потім до підмножини домінуючих варіантів X'' та підмножини остаточних варіантів X''', в якій визначають оптимальний результат – кращий варіант структури ПМ X_{opt}: $X_{\text{opt}} \in X'''$, $X''' \subset X'' \subset X'$ [59].



Варіанти структури пакувальної машини								
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	…	X_{23}	X_{24}
1	0	0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	0	0	0	0	1
1	1	1	1	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	1	0
1	1	1	1	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1

Рис. 4.2. Варіанти структури пакувальної машини

Метод пошуку оптимального варіанту структури ПМ повинен ґрунтува-тися на двох засадах: виділення множини домінуючих альтернатив і вибір серед них оптимальної та виключення ймовірності відсіювання потенційно більш ефективних варіантів у порівнянні з тими, які приймаються для подальшого розгляду.

7. Розробка компонувальної схеми ПМ.

Для реалізації даної процедури необхідно встановити зв'язки між ФМ, що входять до складу оптимального варіанту структури ПМ.

$$R = \{r_1, r_2, r_3, \ldots, r_n\}.$$

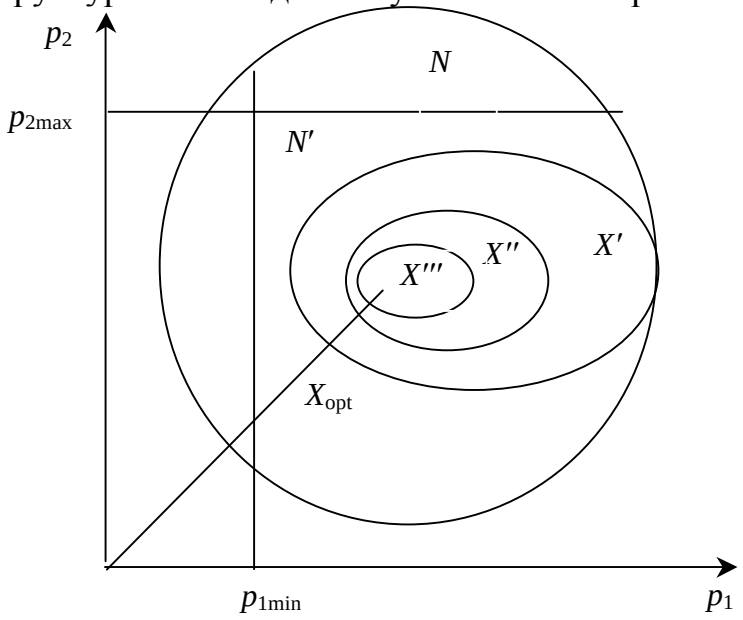


Рис. 4.3. Схема послідовності пошуку оптимальної структури пакувальної машини: p_{1min} – мінімальне граничне значення економічного параметра p_1; p_{2max} – максимальне граничне значення технічного параметра p_2

В загальному випадку матриця зв’язків між ФМ буде мати вигляд:

	x_1	x_2	x_3	…	x_n
x_1	-	r_1			
x_2	r_1	-	r_2		
x_3		r_2	-	r_i	
…			r_i	-	r_n
x_n				r_n	-

Таким чином, будь-яке компонування машини можна описати множиною:

$$K = \{F, X, R\}.$$

Зауважимо, що велика розмірність задачі оптимізаційного синтезу ПМ робить доцільним застосування блочно-ієрархічного підходу (див. рис. 2.4), при якому синтезується не вся машина одразу, а окремі блоки ФМ:

$$\text{ПМ} = \bigcup_{i=1}^{3} \text{БМФ} = \{\text{ФМ} \mid \text{ФМ-1n} \in \text{БФМ-1} \wedge \text{ФМ-2n} \in \text{БФМ-2} \wedge$$
$$\wedge\, \text{ФМ-3n} \in \text{БФМ-3}\}.$$

Такий підхід дає можливість спростити розв’язання задачі оптимізаційного синтезу.

4.2. Процедура генерування варіантів структури ПМ

Під час розв'язання дискретної поетапної задачі оптимізаційного синтезу структури ПМ довільної складності та вибору найбільш ефективного розв'язку потрібно знайти множину допустимих альтернатив. Для цього повинні бути встановлені правила генерації усіх можливих варіантів [25].

Генерування варіантів структури ПМ здійснюється з допомогою:

- комбінаторних методів [8], до яких відносяться:

– морфологічний синтез;

– синтез по альтернативних деревах (А-деревах, або "І-АБО"-деревах);

- методу генерування з формальним обмеженням кількості варіантів структури за допомогою типових математичних моделей, нормалізованих ГОСТ 14.416-83.

Морфологічний синтез полягає в знаходженні і систематизації всіх можливих варіантів поєднань ФМ між собою за допомогою морфологічної таблиці. Ця таблиця задається у вигляді матриці інцидентності $A = \|a_{ij}\|$ розміру F x E, де F – кількість функцій, які повинні виконуватись машиною; E – число ФМ, з яких вона складається, причому елемент матриці a_{ij}, що стоїть на перетині i-го рядка і j-го стовпця дорівнює одиниці, якщо він виконує функцію, нулю – якщо не виконує [23]

Метод морфологічного синтезу застосовується на ранніх стадіях проектування. Він дозволяє знайти і систематизувати усі можливі способи структурної побудови ПМ, однак його доцільно застосовувати тільки для ПМ із незначною кількістю елементів.

Синтез по альтернативних деревах (А-деревах, або "І-АБО"-деревах) [8] має таке ж призначення, що й метод морфологічного синтезу, однак відрізняється способом формалізації опису структури об'єкта проектування.

Згідно методики, описаної в [15], побудова А-дерев здійснюється таким чином, що корінь дерева (початкова вершина) відповідає функції (технологічній операції), яку виконує проектований технічний об'єкт; рівні дерева відображають технологічні переходи, з яких складається технологічна операція; вершини являють собою технічні

засоби реалізації технологічних переходів (елементи структури технічного об'єкту); дуги дерева описують зв'язки між елементами. Якщо на певному рівні існує тільки одна вершина (технологічний перехід може бути реалізований тільки одним елементом структури), то відповідну вершину (тип "І") позначають темним кружечком, якщо таких вершин декілька (тип "АБО"), їх позначають світлими кружечками.

Позитивною особливістю методу є можливість відображення ієрархічної будови ПМ та зв'язків між ФМ, однак графове зображення варіантів структур має обмеження по кількості представлених елементів, тому "І-АБО"-дерева з великим числом вершин неможливо представити у явній формі.

Генерування з формальним обмеженням кількості варіантів структури ПМ здійснюється за допомогою типових математичних моделей [21].

В основі побудови варіантів структури лежить однакове математичне представлення структури різних ТМ. У цих моделях використано три типи даних про об'єкт синтезу, які формують три множини: множина елементів – ФМ; множина ознак чи характеристик ТМ; множина відношень між елементами та ознаками чи характеристиками ТМ.

З допомогою даного методу враховуються наступні ознаки відмінностей між альтернативними варіантами структури ПМ:

– якісний склад елементів, тобто можливі варіанти ФМ, які утворюють ПМ (F_E);

– кількість ФМ, що утворюють ПМ (F_N);

– порядок ФМ у структурі ПМ ($F_П$).

Якщо при генеруванні варіантів структури ПМ у всіх варіантів склад ФМ однаковий, то F_E= 1, якщо різний – F_E= 0. Якщо у всіх варіантах структури буде однаковою кількість ФМ, то F_N = 1, якщо різною – то F_N = 0. Якщо послідовність об'єднання ФМ у структурі ПМ у всіх варіантах буде однаковою, то $F_П$ = 1, якщо різною – $F_П$ = 0.

Залежно від генерування варіантів структури об'єкта за тими чи іншими відмінностями використовуються наступні класи математичних моделей структури (табл. 2.1):

- *сполучні*, яка характеризується тільки двома ознаками генеруючих відмінностей структурних варіантів $F(S) = (F_E, F_N)$;
- *упорядкувальні*, котрі враховують усі три ознаки $F(S) = (F_E, F_N, F_П)$.

Оскільки ПМ є впорядкованою системою саме упорядкувальні моделі, на відміну від сполучних, є придатними для її опису.

Табличні моделі MS11 дають змогу створити структуру ПМ з урахуванням порядку її елементів.

Таблиця 4.1

Класифікація математичних моделей генерування варіантів структури

Модель			Ознака генерування варіантів структури		
Клас	Підклас	Позначення	F_E	F_N	$F_П$
Сполучна	0	MS01 MS02 MS03	1 0 0	1 1 0	– – –
Упорядкувальна	Таблична – 1	MS11	1	1	1
	Мережева – 2	MS21 MS22	0 0	1 0	1 1
	Перестановна – 3	MS31 MS32 MS33	1 0 0	1 1 0	0 0 0

Мережеві моделі MS21 та MS22 можуть використовуватись для генерування багатьох варіантів структури ПМ. Відношення порядку $F_П$ між елементами ТМ задається за допомогою графа. Мережева модель дозволяє генерувати безліч варіантів структури ПМ, але всі вони матимуть задану послідовність виконання технологічної операції.

Наступним етапом проектування при цьому є вибір кращого із отриманих варіантів, що вимагає аналізу всіх отриманих варіантів з точки зору їх відповідності критерію якості. Застосування моделі такого типу значно спрощує вибір оптимального варіанта структури, оскільки при її побудові одразу відкидаються нелогічні поєднання ФМ.

Перестановні моделі MS31, MS32, MS33 дають змогу генерувати варіанти структур, які окрім складу елементів, їх кількості, відрізнятимуться також порядком їх поєднання.

Відмінність розглянутих методів полягає в тому, що при морфологічному синтезі та синтезі по альтернативних деревах створюють всі можливі комбінації ФМ у складі ПМ, а при використанні типових математичних моделей кількість можливих варіантів скорочується шляхом відхилення неможливих.

4.3. Загальна схема одноетапного і багатоетапного оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури машин для пакування сипких речовин

Формалізація процедур оптимізаційного синтезу структури машини для пакування сипких речовин здійснюється на основі одного із таких підходів [**Error! Bookmark not defined.**77]:

1) **Стратегія одноетапного оптимізаційного синтезу**. Дана стратегія передбачає здійснення синтезу всіх варіантів структури машини з подальшою їх оцінкою та вибором кращого (рис. 4.4);

2) **Стратегія багатоетапного оптимізаційного синтезу**. Ця стратегія полягає тому, що генерація варіанту структури здійснюється таким чином, що його нарощування та оцінка чергуються між собою після додавання елементу з кожної наступної підмножини до попередніх (рис. 4.5). Багатоетапний оптимізаційний синтез може здійснюватись як у прямій послідовності (в напрямку “зверху-вниз”), починаючи з ФМ, який виконує перший технологічний перехід (рис. 4.5, *а*), так і у зворотній послідовності (в напрямку “знизу-вгору”), почи-наючи із ФМ, який виконує останній технологічний перехід (рис. 4.5, *б*).

Для здійснення ***одноетапного*** оптимізаційного синтезу використовують комбінаторні методи, в основу яких покладено алгоритм повного перебирання всіх точок ОДР, для кожної з яких визначено перелік ФМ та значення функції мети. Алгоритм перебору характеризуються можливістю розгляду тільки варіантів готових закінчених структур та реалізуються у такій послідовності:

1) вибір або генерація чергового варіанту структури;
2) оцінка варіанту;
3) прийняття рішення по даному варіанту.

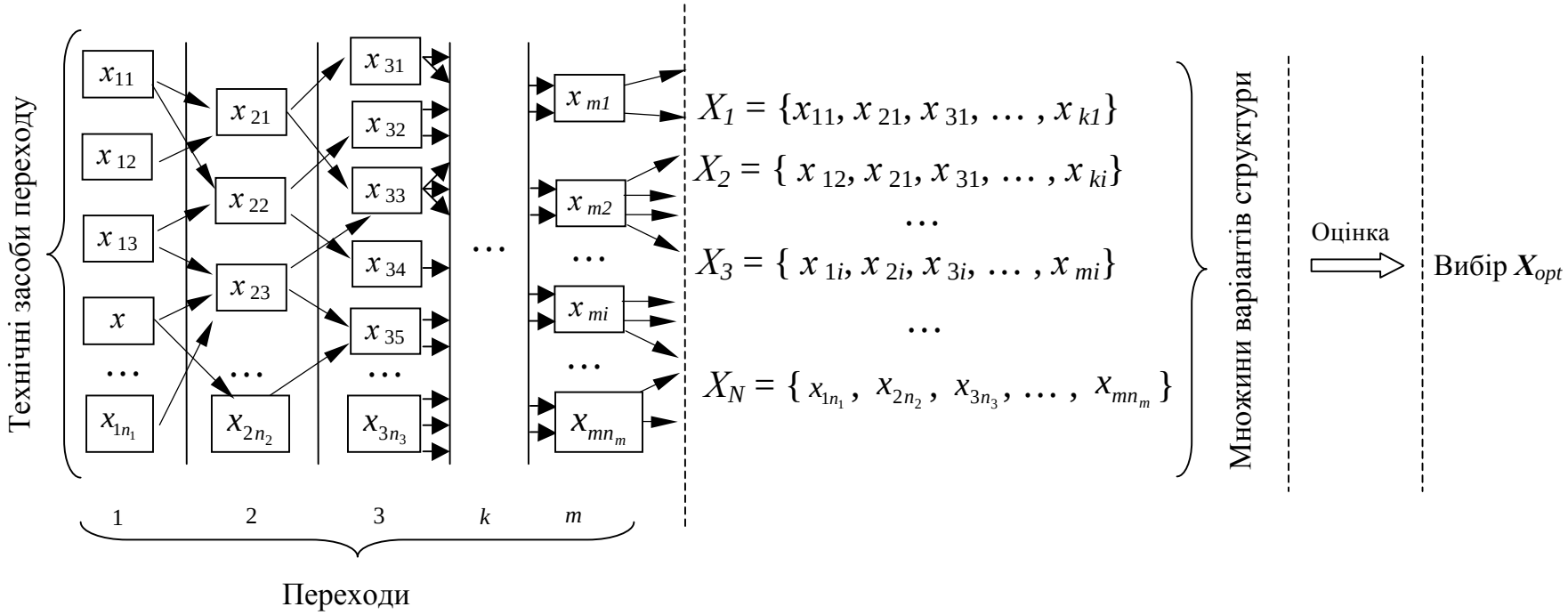
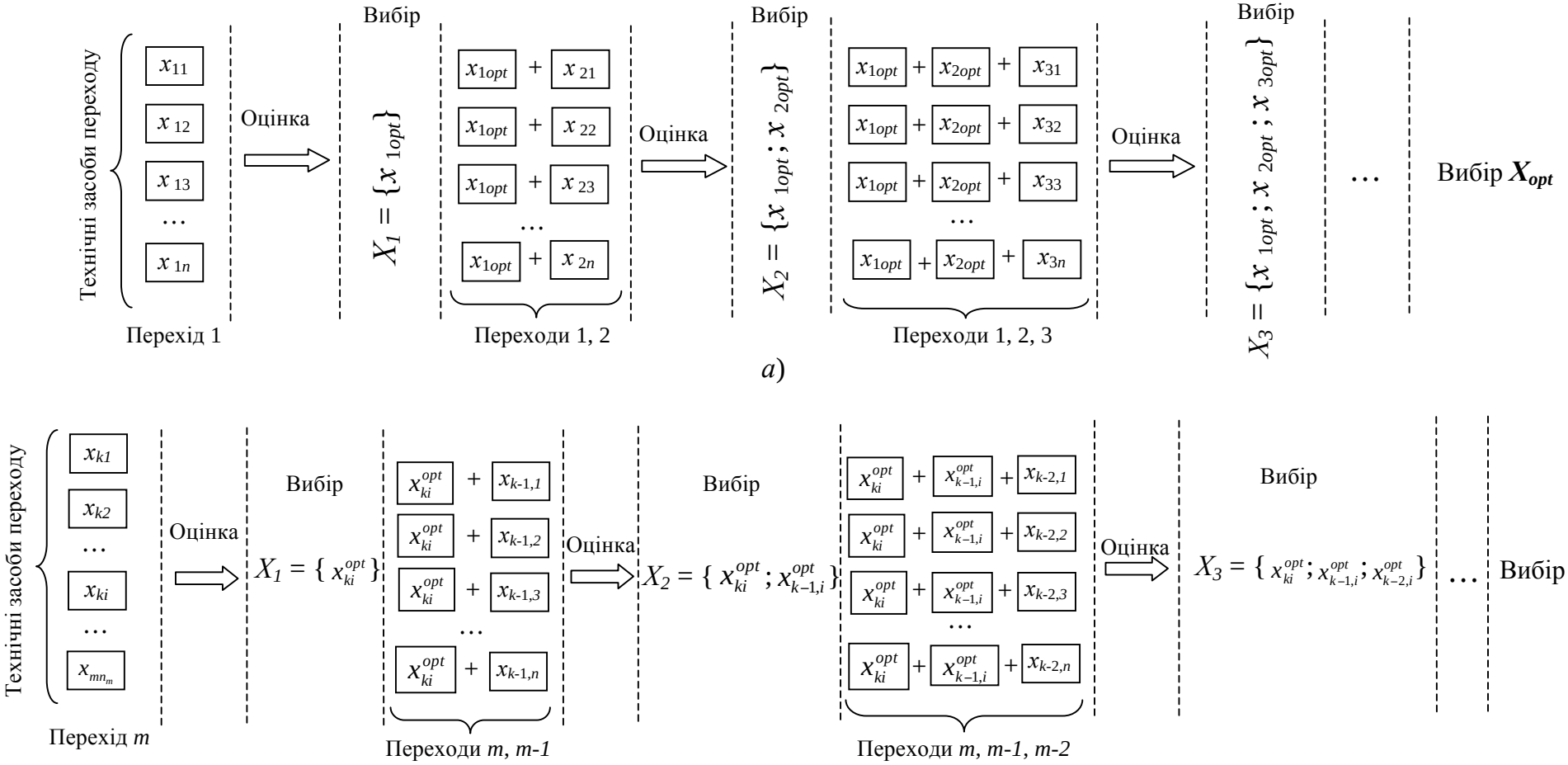


Рис. 4.4. Схема реалізації стратегії одноетапного оптимізаційного синтезу структури технологічної машини



а)

б)

Рис. 4.5. Схема реалізації стратегії багатоетапного оптимізаційного синтезу структури технологічної машини: *а*) в прямій послідовності; *б*) в зворотній послідовності

Як вже зазначалось, зростання числа ФМ, що можуть входити до складу машини, та варіантів їх конструктивного виконання пропорційне зростанню розмірності ОДР, що вимагає значних обчислювальних ресурсів для розв'язання задачі. Тому алгоритм повного перебирання ефективний при невеликій кількості початкових даних й, відповідно, варіантів допустимих розв'язків. В протилежному випадку здійснення оптимізаційного синтезу структури машини з використанням цього алгоритму стає невиправдано трудомістким процесом.

В такому разі слід перейти до стратегії багатоетапного оптимізаційного синтезу.

Для здійснення ***багатоетапного*** оптимізаційного синтезу використовуються **послідовні алгоритми**, що характеризуються покроковим розв'язуванням задачі синтезу з можливістю оцінки проміжних структур на кожному кроці розв'язання.

Ці алгоритми покладені в основу методів *направленого перебирання*, що ґрунтуються на можливості поетапного відхилення неперспективних напрямків.

Методика послідовного розвитку, аналізу і відсіювання варіантів полягає в такому способі розвитку варіантів, при якому відсіюються безперспективні початкові частини варіантів як за накладеними обмеженнями, так і за функцією мети, до їх остаточної побудови. Оскільки при відсіюванні безперспективних початкових частин варіантів відсіюється тим самим і вся множина їх продовжень, то відбувається значна економія обчислювальних витрат. Таким чином, послідовні алгоритми дають можливість звести розв'язування задачі великої розмірності до розв'язування сукупності задач малих розмірностей.

4.4. Застосування багатокритеріального поетапного вибору рішень при оптимізаційному синтезі функціонально-модульної структури машини

Пошук кращого розв'язку задачі оптимізації за декількома критеріями – досить складна задача, адже, будь-якій ПМ властиві такі характеристики, кількісні значення яких бажано максимізувати, а також такі, котрі бажано кількісно зменшити. Але між окремими

характеристиками існує взаємна залежність і діє ряд обмежень. Внаслідок цього поза деякою областю збільшення одних характеристик неминуче спричиняється зменшення інших, причому тих, чисельні значення яких бажано також збільшувати, і навпаки.

Протягом тривалого часу подібні внутрішні протиріччя технічних задач вирішували так: з багатьох характеристик вибирали одну – найважливішу для даної задачі, після чого шукали її екстремум за умови дотримання певних обмежень. Такі задачі називають *однокритеріальними* чи *одноцільовими*. Але, якщо оптимальне значення однієї з найважливіших характеристик машини спричиняє неприйнятне зниження іншої важливої характеристики, то однокритеріальний підхід до задачі стає вже непридатним.

Тому виникає необхідність у розробці та використанні методів пошуку оптимальних розв'язків задач, що характеризуються декількома критеріями, тобто для здійснення багатокритеріальної оптимізації [55].

Для розв'язання цієї задачі оптимізації введено наступні позначення: кожний із скалярних критеріїв $f_k(X)$, $k \in [1, s]$ є *частковим критерієм оптимальності*, а їх сукупність $F(X) = (f_1(X), f_2(X), ..., f_S(X))$ – *векторним (інтегральним) критерієм оптимальності*, причому $f_1(X), f_2(X), ..., f_S(X)$ формують область допустимих значень (ОДЗ) вектора варійованих параметрів X, тобто $D_X \in X$ [56].

Таким чином, розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації, в загальному випадку, зводиться до пошуку мінімального чи максимального значення критерію $F(X)$, причому воно буде оптимальним не для якогось із часткових критеріїв, а виявляється деяким компромісом для $F(X)$ в цілому.

Розглянемо задачу багатокритеріального поетапного вибору ефективних рішень ПМ довільної структури з позицій системного підходу.

Процес розв'язування задачі можна розбити на такі послідовно виконувані етапи [69]:

1. Формалізація задачі.

Оскільки структуру ПМ можна описати у вигляді графа, то і проблему багатокритеріального поетапного вибору рішень формально можливо звести до вибору на графах.

В результаті відповідних перетворень отримується орієнтований граф $G = (V, E)$, де $V = \{v1, v2, \ldots, vn\}$ – множина вершин, що являють

собою можливі технологічної переходи; $E = \{[vi, vj]\} = \{e\}$, $(i, j = 1, n, i \neq j)$ – множина дуг, що з'єднують ці вершини (множина матеріальних, інформаційних, енергетичних потоків), причому кожна дуга $e \in E$ характеризується набором ваг $\omega_k(e), k = \overline{1,m}$.

Тоді можливе рішення можна асоціювати з деяким підграфом $g = (Vg, Eg)$, $Vg \subset V$, $Eg \subset E$ початкового графа, який відображає послідовність виконання технологічних переходів.

На множині всіх можливих рішень {g} визначена векторна критеріальна функція $x(g) = (x1,(g), x2(g), ..., xm(g))$, де $x_k(g) = \sum_{e \in E_g} \omega_k(e), k = \overline{1,m}$ – k-й критерій ефективності кожного рішення. Цей критерій повинен володіти властивістю адитивності в силу специфіки розглядуваної задачі, що полягає в необхідності сумування значень часткових критеріїв оптимальності по кожному ФМ, що формує той чи інший варіант структури ПМ.

У такому вигляді задача багатокритеріального поетапного вибору рішень полягає у виборі із множини можливих рішень деякої сукупності ефективних альтернатив

$$X = \{x(g)\} = C(\{g\}) \subseteq \text{PAR},$$

де PAR – Парето-множина, яку за правилами методу пошуку Парето-ефективних рішень вибирає проектант;

C – функція вибору.

Розглянемо метод пошуку Парето-ефективних рішень більш детально.

Введемо поняття простору критеріїв $\{F\}$, яке має розмірність s (за кількістю часткових критеріїв, якими оцінюється ПМ) і утворюється s ортогональними осями, на яких відкладаються значення $f_k(X)$, $k \in [1,s]$.

Введемо на множині D_X відношення пріоритету $\succ$. Тоді за умов $F(X) \to \max$ та $f_k(X^1) \geq f_k(X^2), \ k \in [1,s]$ вектор $X_1 \in D_X$ має пріоритет над вектором $X_2 \in D_X$, що позначимо як $X^1 \succ X^2$. Аналогічно на множині D_X введемо відношення домінування $\triangleleft$. При $X^1 \succ X^2$ векторний критерій оптимальності $F(X^1) \in D_X$ домінує над $F(X^2) \in D_X$, тобто $F(X^1) \triangleleft F(X^2)$.

Введені відношення пріоритету і домінування є транзитивними, тобто якщо $X^1 \succ X^2$ і $X^2 \succ X^3$, то $X^1 \succ X^3$, аналогічно якщо $F(X^1) \triangleleft F(X^2)$ і $F(X^2) \triangleleft F(X^3)$, то $F(X^1) \triangleleft F(X^3)$.

Виділимо із множини D_X підмножину $D_X^* \in D_X$ точок, для яких немає точок, що над ними домінують. Вказана множина D_X^* є множиною Парето, тобто така множина, в якій значення будь-якого із часткових критеріїв оптимізації можна покращити тільки за рахунок погіршення іншого [56].

2. Формування інтегральних рішень (композиція рішення) здійснюється об'єднанням фрагментів ефективних напрямків на графі з урахуванням зв'язків і обмежень, що забезпечують цілісність ПМ. В результаті такої процедури отримуємо множину інтегральних варіантів технічних рішень, кожен з яких характеризується сукупністю значень критеріїв відповідно до умови адитивності цих критеріїв.

Зауважимо, що не всі показники ефективності роботи ПМ, які використовуються як критерії оптимальності, володіють властивістю адитивності, тобто можливістю знаходження загального значення по даному критерію для всієї машини шляхом додавання відповідних значень цього ж критерію по кожному ФМ, який входить до її складу.

Одним з таких критеріїв є надійність, що виражається коефіцієнтом $K_Г$:

$$\hat{E}_{Ã} = \frac{m_t}{m_t + m_{Â}}, \qquad (4.1)$$

де m_t – відношення напрацювання відновлюваного об'єкта до математичного сподівання числа його відмов n у процесі цього напрацювання

$m_{Â}$ – середня тривалість відновлення працездатності ПМ, або

$$\hat{E}_{Ã} = Ð_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\lambda_i}{\mu_i}\right)} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{\hat{E}_{Ãi}} - 1\right)}, \qquad (4.2)$$

де P_0 – ймовірність перебування ПМ у працездатному стані;

μ_i – інтенсивність відновлень працездатності ПМ.

Величина, обернена до коефіцієнта готовності, називається коефіцієнтом простоювання $K_П$, який визначається як

$$\hat{E}_{Ï} = 1 - \hat{E}_{Ã}. \qquad (4.3)$$

Виведемо новий коефіцієнт для оцінки надійності кожного ФМ та ПМ в цілому.

Користуючись формулами (4.2, 4.3) зробимо наступні перетворення:

$$\frac{1}{K_Г} - 1 = \frac{1 - K_Г}{K_Г} = \frac{K_П}{K_Г}, \qquad (4.4)$$

де $КП$ – коефіцієнт простоювання.

Підставивши $\frac{K_П}{K_Г}$ у формулу (4.4), отримаємо

$$K_Г = \frac{1}{1 + \frac{K_{П1}}{K_{Г1}} + \frac{K_{П2}}{K_{Г2}} + \frac{K_{П3}}{K_{Г3}} + ... + \frac{K_{Пi}}{K_{Гi}}}, \qquad (4.5)$$

тоді

$$\frac{1}{K_Г} = 1 + \frac{K_{П1}}{K_{Г1}} + \frac{K_{П2}}{K_{Г2}} + \frac{K_{П3}}{K_{Г3}} + ... + \frac{K_{Пi}}{K_{Гi}}, \qquad (4.6)$$

таким чином

$$\frac{K_П}{K_Г} = \sum_{i=1}^{n} \frac{K_{Пi}}{K_{Гi}} \qquad (4.7)$$

Введене співвідношення назвемо *коефіцієнтом відносної готовності* і позначимо $K_{ВГ}$ [73]:

$$\frac{K_П}{K_Г} = \sum_{i=1}^{n} \frac{K_{Пi}}{K_{Гi}} = \frac{1 - K_Г}{K_Г} = K_{ВГ} \qquad (4.8)$$

Таким чином, коефіцієнт $K_{ВГ}$ є адитивним. Тобто при умові, що кожне x_i характеризується власним значенням коефіцієнта $K_{ВГi}$, величина $K_{ВГ}$ всієї машини визначиться як сума значень $K_{ВГi}$ всіх x, що входять до її складу. Тоді для будь-якого варіанта структури машини $X_i = \{x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n\}$

$$K_{ВГ} = K_{ВГ1} + K_{ВГ2} + K_{ВГ3} + \ldots + K_{ВГn}.$$

Властивість адитивності коефіцієнта $K_{ВГ}$ значно полегшує розв'язання задачі оптимізації, оскільки в результаті спрощення процедури розрахунку в рази скорочується його тривалість.

Зауважимо, що даний коефіцієнт відображає накопичення ненадійності ПМ при зростанні числа ФМ, з яких вона складається. Тому якщо надійність виражати саме через $K_{ВГ}$, то задача максимізації перетвориться на задачу мінімізації.

Серед знайдених варіантів рішень можуть виявитися і неефективні, які необхідно відкинути. Для цього пропонується використати функцію вибору на множині можливих інтегральних варіантів ПМ. У результаті отримується множина ефективних рішень D_x, з якої необхідно зробити остаточний вибір.

3. Остаточний вибір. Форма представлення отриманого результату може бути різною і залежить від поставленого завдання. Це може бути: одна оптимальна альтернатива; кінцева множина альтернатив; сукупність оцінок кожної альтернативи у балах та ін.

Звернемо увагу на те, що часткові критерії мають різну фізичну природу і тому різну розмірність, а значить просто сумувати їх некоректно, тому, як правило, узагальнений критерій є результатом чисто формального об'єднання часткових критеріїв.

Залежно від того, яким чином часткові критерії об'єднуються в узагальнений, розрізняють такі види узагальнених критеріїв:

1. Адитивний критерій;
2. Мультиплікативний критерій;
3. Максимінний (мінімаксний) критерій.

Під час застосування ***адитивного*** критерію функцію мети отримують шляхом складання нормованих значень часткових критеріїв. У загальному вигляді функція мети:

$$F(X) = \sum_{i=1}^{n} C_i \frac{f_i(X)}{f_i^0(X)} = \sum_{i=1}^{n} C_i f_i^*(X) \to \max(\min), \qquad (4.9)$$

де n – кількість об'єднуваних часткових критеріїв;

C_i – ваговий коефіцієнт i-го часткового критерію;

$f_i(X)$ – значення i-го часткового критерію;

$f_i^0(X)$ – i-й нормуючий дільник (максимальне (мінімальне) значення i-го критерію в ОДЗ);

$f_i^*(X)$ – нормоване значення i-го часткового критерію.

Числове значення вагового коефіцієнту призначається експертом довільно, а його величина залежить від ступеню важливості розглядуваного критерію в порівнянні з іншими. Розмірності самих часткових критеріїв і відповідних нормуючих дільників однакові, тому значення узагальнених адитивних критеріїв, отриманих в результаті розрахунку, є безрозмірними величинами, серед яких легко визначити шукане (максимальне чи мінімальне).

Розмірності самих часткових критеріїв і відповідних нормуючих дільників однакові, тому у результаті узагальнений адитивний критерій виходить безрозмірною величиною.

Адитивний критерій використовують, якщо істотне значення мають абсо-лютні значення критеріїв при вибраному векторі параметрів X.

Для ***мультиплікативного*** критерію функція мети записується таким чином:

$$F(X) = \prod_{i=1}^{n} C_i F_i(X) \rightarrow \max(\min), \qquad (4.10)$$

де П – знак похідної;

C_i – ваговий коефіцієнт *і-го* часткового критерію.

Мультиплікативний критерій не вимагає нормування часткових критеріїв та майже завжди забезпечує отримання одного оптимального розв'язку, однак при його застосуванні виникають труднощі із призначенням вагових коефіцієнтів, а при перемножуванні значень часткових критеріїв відбувається їх взаємна компенсація, що знижує точність отриманого результату.

Даний критерій застосовують у випадку, коли істотну роль грає зміна абсолютних значень часткових критеріїв при варіації вектора параметрів *X*.

Максимінний (мінімаксний) критерій працює за принципом компромісу, який ґрунтується на ідеї рівномірності. Суть принципу максиміну полягає в наступному. Оскільки за наявності великого числа часткових критеріїв встано-вити між ними аналітичний взаємозв'язок дуже складно, то прагнуть знайти такі значення змінних (параметрів), при яких нормовані значення всіх часткових критеріїв рівні між собою:

$$C_i f_i(X) = K, \qquad (4.11)$$

де C_i – ваговий коефіцієнт *і-го* часткового критерію;

$f_i(X)$ – нормоване значення *і-го* часткового критерію;

K – константа.

Формально принцип максиміну формулюється таким чином: вибрати такий набір змінних, при якому реалізується максимум з мінімальних нормо-ваних значень часткових критеріїв, тобто

$$F(X^{(0)}) = \max \min f_i(X). \qquad (4.12)$$

Якщо часткові критерії необхідно мінімізувати, то найбільш відстаючим критерієм є той, який набуває максимального значення. В цьому випадку застосовують **принцип мінімаксу**:

$$F(X^{(0)}) = \min \max f_i(X) \qquad (4.13)$$

Максиминный (мінімаксний) критерій використовують, якщо поставлено завдання досягти рівності нормованих значень суперечливих (конфліктних) часткових критеріїв.

Розроблена системна модель багатокритеріального поетапного вибору рішень показана на рис. 4.6.

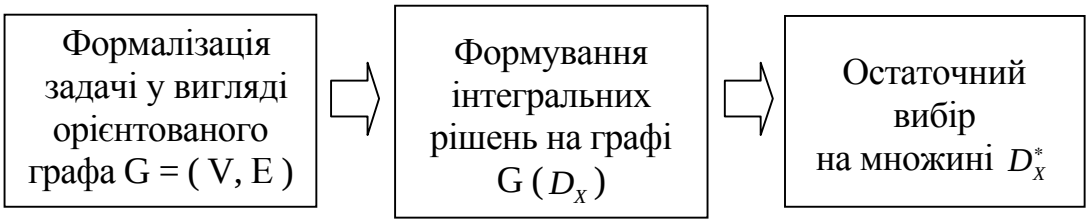


Рис. 4.6. Системна модель багатокритеріального поетапного вибору рішень

4.5. Оптимізаційний синтез базової функціонально-модульної структури машини методом гілок і меж

Розглянемо процедуру розв'язування задачі структурної оптимізації машини для пакування сипких речовин з допомогою методу гілок і меж, типовий склад якої формують ФМ, приведені в табл. 4.1. Кожен із вказаних ФМ характеризується такими показниками, як надійність та вартість. Завдання оптимізації в даному випадку полягає в знаходженні такої множини ФМ, щоб виконувались усі технологічні переходи операції пакування, причому надій-ність машини повинна бути максимально високою, а вартість не перевищувала гранично допустимого значення.

Зауважимо, що не всі ФМ є взаємопоєднуваними, оскільки одну і ту ж функцію повинен виконувати у складі одного й того ж автомату лише один ФМ. Граф логічних зв'язків між прийнятими до розгляду ФМ представлено на рис. 4.7.

Формалізоване представлення графа виражається наступним чином:

$$S : m_1(x_{11}) \wedge m_2(x_{21} \vee x_{22} \vee x_{23}) \wedge m_3(x_{31}) \wedge m_4(x_{41}) \wedge m_5(x_{51}) \wedge$$
$$\wedge m_6(x_{61} \vee x_{62}) \wedge m_7(x_{71}) \wedge m_8(x_{81} \vee x_{82} \vee x_{83} \vee x_{84} \vee x_{85} \vee x_{86} \vee x_{87} \vee x_{88}) \wedge$$
$$\wedge m_9(x_{91} \vee x_{92}) \wedge m_{10}(x_{101}) \wedge m_{11}(x_{111} \vee x_{112}).$$

Таблиця 1.4

Вихідні дані для розв'язку задачі оптимізації методом гілок і меж

Назва ФМ		Позначення ФМ	Варіант конструкції ФМ (типорозмір)	Критерії оптимізації			Відношення *Bi/KBГi*
				Надійність		Вартість (*vi*)	
				КГi	*КВГi*		
Бункер		*x1*	*x*11	0,99	0,0101	2560	253465
Дозатор	Ваговий	*x*2	*x*21	0,97	0,0309	15100	488673
	Стаканчиковий		*x*22	0,99	0,0204	5600	274509
	Шиберний		*x*23	0,96	0,0417	3540	84892
Механізм подачі плівки		*x*3	*x*31	0,99	0,0101	5600	274510
Рукавоутворювач		*x*4	*x*41	0,99	0,0101	3540	350495
Датчик мітки		*x*5	*x*51	0,99	0,0101	2300	112745
Зварювальний пристрій поздовжнього зварювання	Зварювальний ролик	*x*6	*x*61	0,98	0,0204	9200	450980
	Зварна губка		*x*62	0,99	0,0101	9380	303560
Блок керування		*x*7	*x*71	0,98	0,0204	3400	336634

Продовження табл. 4.1

Зварювальний пристрій поперечного зварювання	Зварні губки (ЗГ)	*x*8	*x*81	0,98	0,0204	10100	495098
	ЗГ з механізмом відрізання		*x*82	0,97	0,0309	12040	389644
	ЗГ з механізмом протяжки		*x*83	0,97	0,0309	13200	316547
	ЗГ з вмонтованим дататором		*x*84	0,98	0,0204	11900	385113
	ЗГ з механізмами протяжки і відрізання		*x*85	0,98	0,0204	14020	219749
	ЗГ з механізмом відрізання і вмонтованим дататором		*x*86	0,97	0,0417	12500	299760
	ЗГ з механізмом протяжки і вмонтованим дататором		*x*87	0,95	0,0526	13900	264258
	ЗГ з механізмами протяжки, відрізання і вмонтованим дататором		*x*88	0,93	0,0757	14600	192866
Механізм протягування рукава	Ролики	*x*9	*x*91	0,97	0,0309	1560	50485
	Натяжні ремені		*x*92	0,96	0,0417	2300	55156
Відрізні ножі		*x*10	*x*101	0,98	0,0204	1470	35252
Датувальний пристрій	Друкувальний	*x*11	*x*111	0,97	0,0309	5000	161812
	Штампувальний		*x*112	0,98	0,0204	4370	214215

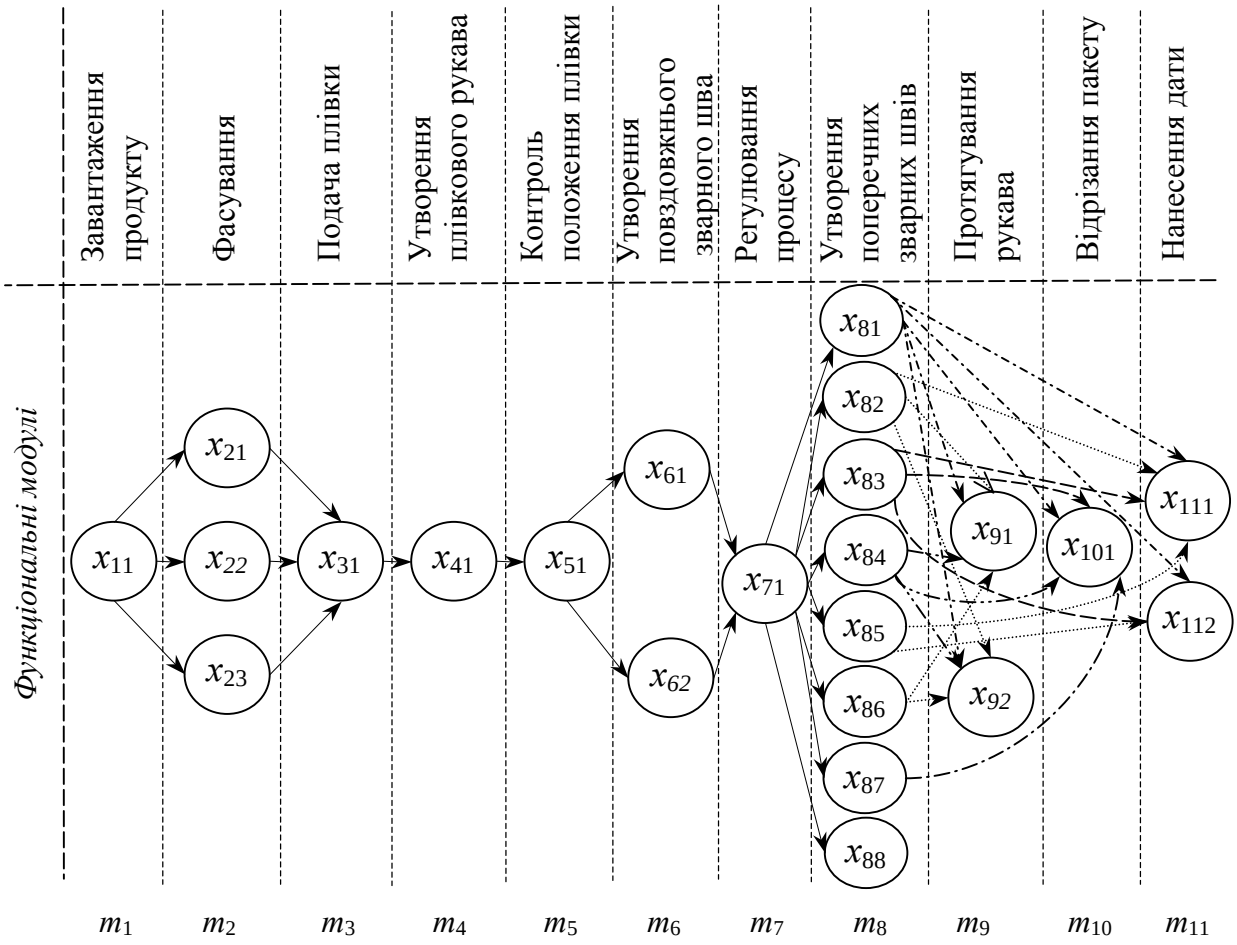


Рис. 4.7. Граф логічних зв'язків між функціональними модулями машини для пакування сипких речовин

Отже, прийнявши за критерій оптимізації надійність, виражену коефіцієнтом готовності K_{Γ}, математичну модель задачі сформулюємо таким чином:

$$f(X) = \sum_{i=1}^{n} K_{\Gamma ij} \cdot x_{ij} \to \max, X \in G$$

при умові

$$\begin{cases} \sum_{i.\,j=1}^{n} v_{ij} \cdot x_{ij} \le v_{\Gamma P} \\ x_{ij} \in \{0;\ 1\},\ \ i = \overline{1,n},\ \ j = \overline{1,n} \\ x_{ij} - \textit{цілі} \end{cases},$$

де $f(X)$ − функція мети;

$X = (x_{11},...,x_{ij},...,x_n), x_{ij}$ – множина ФМ, що формують склад ПМ, при чому x_i = 1, якщо ФМ входить до *n*-го варіанту структури машини; x_i = 0, якщо не входить;

G – скінченна множина розглядуваних ФМ;

v_i – вартість, грн.

У випадку вибору надійності як критерію оптимальності процес розв'язування задачі ускладнюється тим, що коефіцієнт готовності $K_Г$ не є адитивним, тобто $K_Г$ машини в цілому не можна отримати шляхом безпосереднього сумування $K_Г$ тих ФМ, які входять до її складу. У зв'язку із цим для спрощення процедури розрахунку задачі використаємо коефіцієнт $K_{ВГ}$ (4.8). При цьому задача максимізації перетвориться на задачу мінімізації.

Виходячи із вказаних зауважень, функцію мети представимо у вигляді:

$$f(X) = \sum_{i,j=1}^{n} K_{ВГij} \cdot x_{ij} \to \min, X \in G,$$

а обмеження залишимо без змін:

$$\begin{cases} \sum_{i.j=1}^{n} v_{ij} \cdot x_{ij} \le v_{ГР} \\ x_{ij} \in \{0;\ 1\},\ \ i = \overline{1,n},\ \ j = \overline{1,n} \\ x_{ij} - цілі \end{cases}.$$

Отже, для даної задачі функція мети набуде виду:

$$f(X_{поч}) = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} \to \min,$$

а обмеження по вартості для неї встановимо:

$$\begin{cases} \sum_{i,j=1}^{n} x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} \le 45000 \\ x_{ij} \in \{0;\ 1\},\ \ i = \overline{1,n},\ \ j = \overline{1,n} \\ x_{ij} - цілі \end{cases}.$$

Однак слід зауважити, що оскільки наявність у складі ПМ тих ФМ, для яких представлено по одному типорозміру, є обов'язковою для виконання відповідних функцій, то їхні параметри в ході розв'язування задачі враховувати не будемо, тому для спрощення розрахунку приймемо для розгляду множину:

$$X_{\text{поч}} = \{x_2; x_6; x_8; x_9; x_{10}; x_{11}\},$$

а функцію мети представимо як:

$$f(X) = x_2 + x_6 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} \to \min.$$

Тоді накладене обмеження буде дорівнювати різниці між прийнятим граничним значенням по вартості і сумою вартостей тих ФМ, які не ввійшли до множини $X_{\text{поч}}$, тобто при

$v_{гр} - (v_1 + v_3 + v_4 + v_5 + v_7) = 45000 - 17400 = 27600$ (грн)

будемо мати:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} x_2 + x_6 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} \le 27600 \\ x_{ij} \in \{0; 1\}, \ i = \overline{1,n}, \ j = \overline{1,n} \\ x_{ij} - цілі \end{cases}.$$

Розв'язування задачі розпочнемо із вибору довільного варіанта структури. Відобразимо його множиною X_1 :

$$X_1 = \{ x_{21}; x_{61}; x_{81}; x_{91}; x_{101}; x_{111}\}.$$

Наступним кроком є визначення порядку зростання значень відповідних співвідношень $\frac{v_i}{K_{ВГi}}$ по кожному x_i із множини X_1:

$$\frac{v_{101}}{K_{ВГ101}} < \frac{v_{91}}{K_{ВГ91}} < \frac{v_{111}}{K_{ВГ111}} < \frac{v_{61}}{K_{ВГ61}} < \frac{v_{21}}{K_{ВГ21}} < \frac{v_{81}}{K_{ВГ81}}.$$

Початковий опорний план визначимо таким чином: нехай $x_{101} = 1$, оскільки $\frac{v_{101}}{K_{ВГ101}}$ найменше. Віднімаючи від сумарної граничної вартості вартість даного ФМ, одержимо вартість, яка розділиться між рештою ФМ даної множини, тобто:

$x_{101} = 1$, $v_{\text{гр}} = 27600 - 1470 = 26130$ грн;

$x_{91} = 1$, $v_{\text{гр}} = 26130 - 1560 = 24570$ грн;

$x_{111} = 1$, $v_{\text{гр}} = 24570 - 5000 = 19570$ грн;

$x_{61} = 1$, $v_{\text{гр}} = 19570 - 9200 = 10370$ грн.

Для наступного елементу $v_{21} = 15100$ грн > $v_{\text{гр}} = 10370$ грн, тому x_{21} буде дробовим. Елемент, що залишився – x_{81}, позначимо нулем.

Таким чином, початковий опорний план:

$$X_1' = \left\{\frac{10370}{15100}; 1; 0; 1; 1; 1\right\}.$$

Так як ФМ x_{21} вичерпав закладений ресурс по вартості і не задовольняє умові задачі, замінимо його на еквівалентний – x_{22}. Тоді множина, яку розглядатимемо далі, набуде виду:

$$X_2 = \{x_{22}; x_{61}; x_{81}; x_{91}; x_{101}; x_{111}\}.$$

При порівнянні відношень $\frac{v_i}{\hat{E}_{\hat{A}\tilde{A}i}}$ надалі одержимо:

$$\frac{v_{101}}{K_{B\Gamma 101}} < \frac{v_{91}}{K_{B\Gamma 91}} < \frac{v_{111}}{K_{B\Gamma 111}} < \frac{v_{22}}{\hat{E}_{\hat{A}\tilde{A}22}} < \frac{v_{61}}{K_{B\Gamma 61}} < \frac{v_{81}}{K_{B\Gamma 81}}.$$

Отож x_{101} =1; x_{91} = 1; x_{111} = 1; x_{81} = 1; x_{22} =1; x_{61} =1; $v_{\text{гр}}$ = 4770 грн.

Як бачимо, v_{81} = 10100 грн > $v_{\text{гр}}$ = 4770 грн, тож новий опорний план:

$$X_2^{/} = \left\{1;\ 1;\ 1;\ 1;\ 1;\ \frac{4700}{10100}\right\}.$$

Нульові члени відсутні, тому дробовий елемент x_{81} замінюємо на x_{82}. Також вилучимо із розглядуваної множини ФМ x_{101} так як функції x_{82} та x_{101} співпадають. Отож,

$$X_3 = \{x_{22}; x_{61}; x_{82}; x_{91}; x_{111}\}.$$

При порівнянні будемо мати:

$$\frac{v_{91}}{K_{B\Gamma 91}} < \frac{v_{111}}{K_{B\Gamma 111}} < \frac{v_{22}}{\hat{E}_{\hat{A}\tilde{A}22}} < \frac{v_{82}}{\hat{E}_{\hat{A}\tilde{A}82}} < \frac{v_{61}}{K_{B\Gamma 61}}.$$

При цьому x_{91} = 1, x_{111} = 1, x_{22} = 1, x_{82} = 1, $v_{\text{гр}}$ = 3400 грн

v_{61} = 9200 грн > $v_{\text{гр}}$ = 3400 грн, тому x_{61} − дробовий:

$$X_3^{/} = \left\{1;\ \frac{3400}{9200};\ 1;\ 1;\ 1\right\}.$$

З аналогічних міркувань замість x_{61} вводимо x_{62}. Будемо мати:

$$X_4 = \{x_{22}; x_{62}; x_{82}; x_{91}; x_{111}\}.$$

Порівняємо відповідні співвідношення $\frac{v_i}{\hat{E}_{\hat{A}\tilde{A}i}}$:

$$\frac{v_{91}}{K_{B\Gamma 91}} < \frac{v_{111}}{K_{B\Gamma 111}} < \frac{v_{22}}{\hat{E}_{\hat{A}\tilde{A}22}} < \frac{v_{62}}{\hat{E}_{\hat{A}\tilde{A}62}} < \frac{v_{82}}{\hat{E}_{\hat{A}\tilde{A}82}}.$$

Тоді x_{91} = 1, x_{111} = 1, x_{22} = 1, x_{62} = 1, $v_{\text{гр}}$ = 6060 грн.

Звідси v_{82} = 12040 грн > $v_{\text{гр}}$ = 6060 грн, тому x_{82} буде дробовим:

$$X_4^{/} = \left\{1;\ 1;\ \frac{6060}{12040};\ 1;\ 1\right\}.$$

Введемо чергову заміну v_{82} на v_{83}. Отримаємо множину:

$$X_5 = \{x_{22}; x_{62}; x_{83}; x_{101}; x_{111}\}.$$

При цьому

$$\frac{v_{101}}{K_{B\Gamma 101}} < \frac{v_{91}}{K_{B\Gamma 91}} < \frac{v_{111}}{K_{B\Gamma 111}} < \frac{v_{22}}{\hat{E}_{\hat{A}\tilde{A}22}} < \frac{v_{62}}{\hat{E}_{\hat{A}\tilde{A}62}} < \frac{v_{83}}{\hat{E}_{\hat{A}\tilde{A}83}}.$$

Тоді x_{101} = 1, x_{111} = 1, x_{22} = 1, x_{62} = 1, $v_{\text{гр}}$ = 6150 грн.

Звідси v_{83} = 13200 грн > $v_{\text{гр}}$ = 6150 грн, тому x_{83} буде дробовим:

$$X_5^{/} = \left\{1;\ 1;\ \frac{6150}{13200};\ 1;\ 1\right\}.$$

Замінюємо v_{83} на v_{84}. Отримаємо множину:

$$X_6 = \{x_{22};\ x_{62};\ x_{84};\ x_{91;}\, x_{101}\}.$$

У результаті порівняння матимемо:

$$\frac{v_{101}}{K_{ВГ101}} < \frac{v_{91}}{K_{ВГ91}} < \frac{v_{22}}{\hat{E}_{ÂÃ22}} < \frac{v_{62}}{\hat{E}_{ÂÃ62}} < \frac{v_{84}}{\hat{E}_{ÂÃ84}}.$$

Тоді x_{101} = 1, x_{91} = 1, x_{22} = 1, x_{62} = 1, $v_{\text{гр}}$ = 9590 грн.

Звідси v_{84} = 11900 грн > $v_{\text{гр}}$ = 9590 грн, тому x_{84} буде дробовим:

$$X_6^{/} = \left\{1;\ 1;\ \frac{9590}{11900};\ 1;\ 1\right\}.$$

Вводимо чергову заміну v_{84} на v_{85}. Одержимо:

$$X_7 = \{x_{22};\ x_{62};\ x_{85};\ x_{111}\}.$$

Проведемо порівняння по $\frac{v_i}{\hat{E}_{ÂÃi}}$:

$$\frac{v_{111}}{K_{ВГ111}} < \frac{v_{85}}{\hat{E}_{ÂÃ85}} < \frac{v_{22}}{\hat{E}_{ÂÃ22}} < \frac{v_{62}}{\hat{E}_{ÂÃ62}}.$$

Тоді x_{111} = 1, x_{85} = 1, x_{22} = 1, $v_{\text{гр}}$ = 2980 грн.

Звідси v_{62} = 9380 грн > $v_{\text{гр}}$ = 2980 грн, тому $\tilde{o}_{62} = \frac{2980}{9380}$.

Як бачимо, обидва типорозміри ФМ, що призначені для повздовжнього зварювання (x_{61} та x_{62}), набули дробових значень. Однак, виконання даної функції є обов'язковою при здійсненні технологічного процесу пакування, тому виключити цей ФМ зі складу ПМ неможливо, тож необхідно вибрати той із них, який у даному разі більшою мірою задовольняє умові задачі, тобто при $x_{61} = \frac{2980}{9200} > \tilde{o}_{62} = \frac{2980}{9380}$ перевагу слід надати елементу x_{61}. Віднімемо його вартість від початкової граничної і одержимо:

$$v'_{ГР} = 27600 - 9200 = 18400 \text{ грн.}$$

Щоб компенсувати цей вибір, перейдемо до розгляду наступного по величині відношення $\frac{v_i}{K_{КГi}}$ елемента. Ним є x_{22}. Замінимо його на x_{23}, тоді

$$X_8 = \{x_{23};\ x_{61};\ x_{85};\ x_{111}\},$$

причому

$$\frac{v_{23}}{\hat{E}_{ÂÃ23}} < \frac{v_{111}}{K_{ВГ111}} < \frac{v_{85}}{\hat{E}_{ÂÃ85}}.$$

Одержимо:

$x_{23} = 1$, $v'_{ГР} = 18400 - 3540 = 14860$ грн;

$x_{111} = 1$, $v'_{ГР} = 14860 - 5000 = 9860$ грн.

Маємо $v_{85} = 14020$ грн > $v'_{ГР} = 9860$ грн, тому x_{85} буде дробовим.

$$X'_8 = \left\{1;\ 1;\ 1;\ \frac{9280}{14020}\right\}.$$

Змінюємо v_{85} на v_{86}. Отримаємо множину:

$$X_9 = \{x_{23};\ x_{61};\ x_{86};\ x_{91}\},$$

при якій порядок співвідношень:

$$\frac{v_{23}}{\hat{E}_{ÂÃ23}} < \frac{v_{111}}{K_{ВГ111}} < \frac{v_{86}}{\hat{E}_{ÂÃ86}}.$$

в результаті чого – $x_{91} = 1$, $x_{23} = 1$, $x_{86} = 1$, а $v'_{ГР} = 800$ грн.

Одержаний опорний план:

$$X'_9 = \{1;\ 1;\ 1;\ 1\}.$$

Множина X'_9 не містить нульових та дробових елементів, а тому відповідає умові задачі.

Елемент x_{92} не перевіряємо, тому що при $\frac{v_{91}}{K_{ВГ91}} < \frac{v_{92}}{K_{ВГ92}}$ результат покращитись не може.

Перевіримо решту варіантів, які залишились не розглянутими.

Замінимо x_{86} на x_{87}. Отримаємо множину:

$$X_{10} = \{x_{23};\ x_{61};\ x_{87};\ x_{101}\},$$

при якій

$$\frac{v_{101}}{K_{ВГ101}} < \frac{v_{23}}{\hat{E}_{ÂÃ23}} < \frac{v_{111}}{K_{ВГ111}} < \frac{v_{87}}{\hat{E}_{ÂÃ87}},$$

$x_{101} = 1$, $x_{23} = 1$, а $v'_{ГР} = 13390$ грн.

При $v_{87} = 13900$ грн > $v'_{ГР} = 13390$ грн x_{87} буде дробовим:

$$X_{10}' = \left\{1;\ 1;\ 1;\ \frac{13390}{13900}\right\}.$$

Змінюємо x_{87} на x_{88}:

$$X_{11} = \{x_{23};\ x_{61};\ x_{88}\},$$

тоді

$$\frac{v_{23}}{\hat{E}_{\hat{A}\tilde{A}23}} < \frac{v_{88}}{\hat{E}_{\hat{A}\tilde{A}88}},$$

$x_{23} = 1$, $x_{88} = 1$; $v'_{ГР} = 260$ грн.

Опорний план буде:

$$X_{11}' = \{1; 1; 1\},$$

що означає, що одержана множина X_{11} також може бути розв'язком задачі.

Отже, маємо два варіанти структури, які задовольняють умовам задачі оптимізації, виражені множинами $X_9 = \{x_{23}; x_{61}; x_{86}; x_{91}\}$ та $X_{11} = \{x_{23}; x_{61}; x_{88}\}$.

Щоб визначити, який з них кращий, порахуємо для них значення функції мети.

Оскільки $f(X) \to \min$, а $f(X_9) = 0{,}1347 < f(X_{11}) = 0{,}1378$, то оптимальний розв'язок відповідає множині елементів X_9:

$$X_{\text{опт}} = X_9 = \{x_{23}; x_{61}; x_{86}; x_{91}\}.$$

Результати структур машини для пакування сипких речовин, одержані в результаті розв'язання задачі, зведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.3

Варіанти структур машини для пакування сипких речовин

Варіант структури	Функціональні модулі, що формують структуру пакувальної машини	Сумарна вартість, грн	Сумарний $K_{ВГ}$
X_1	$x_{21}; x_{61}; x_{81}; x_{91}; x_{101}; x_{111}$	42430	0,1752
X_2	$x_{22}; x_{61}; x_{81}; x_{91}; x_{101}; x_{111}$	32930	0,1645
X_3	$x_{22}; x_{61}; x_{82}; x_{91}; x_{111}$	33400	0,1335
X_4	$x_{22}; x_{62}; x_{82}; x_{91}; x_{111}$	33580	0,144
X_5	$x_{22}; x_{62}; x_{83}; x_{101}; x_{111}$	34650	0,1656
X_6	$x_{22}; x_{62}; x_{84}; x_{91;} x_{101}$	29910	0,1548
X_7	$x_{22}; x_{62}; x_{85};\ x_{111}$	34000	0,146
X_8	$x_{23}; x_{61}; x_{85};\ x_{111}$	31760	0,1568
X_9	$x_{23}; x_{61}; x_{86}; x_{91}$	26800	0,1347
X_{10}	$x_{23}; x_{61}; x_{87}; x_{101}$	28110	0,1564
X_{11}	$x_{23}; x_{61}; x_{88}$	27340	0,1378

Застосування методу гілок і меж дозволяє з високим ступенем достовірності визначити оптимальний варіант структури ПМ навіть

при тому, що частина розв'язків відсіюється без посереднього розгляду. Це значно прискорює процес розв'язування задачі у порівнянні із затратами часу на повний перебір усіх допустимих варіантів, однак пошук кращого варіанту структури залишається досить трудомістким процесом, складність якого зі збільшенням кількості ФМ, прийнятих до розгляду, зростає в рази.

Зменшення тривалості розв'язування задачі можливе лише у випадку його автоматизованого здійснення.

З метою підвищення ефективності вирішення задачі оптимізації структури ПМ методом гілок і меж нами розроблено програму "Оптимізатор" в середовищі Delphi 7.

Розглянемо принцип її роботи на прикладі задачі, початкові дані якої представлені в табл. 4.3 та на рис. 4.8.

Таблиця 4.3

Початкові дані для автоматизованого розв'язування задачі оптимізації структури машини для пакування сипких речовин методом гілок і меж

Назва ФМ		Позначення ФМ	Варіант конструкції ФМ	Критерії оптимальності		
				Надійність	Ненадійність	Вартість (v_i), грн
				$K_{Гі}$	$K_{ВГі}$	
Бункер	Зі зморушувачем	x_1	x_{11}	0,98	0,0204	1260
	Без зворушувача		x_{12}	0,99	0	730
Дозатор	Об'ємний	x_2	x_{21}	0,97	0,0309	8200
	Ваговий		x_{22}	0,99	0,0101	11200
	Комбінаційний		x_{23}	0,99	0,0101	14800
Механізм амортизації плівки	Ролик, що обертається на осі	x_3	x_{31}	0,99	0,0101	1200
	Ролик, що рухається поступально		x_{32}	0,98	0,0204	1300
	Ролик, встановлений на важелі		x_{33}	0,98	0,0204	1400
	Ролик, закріплений на рамі		x_{34}	0,99	0,0101	900

Продовження табл. 4.3

Механізм гальмування і зупинки плівки	Вакуумний	x_4	x_{41}	0,99	0,0204	640
	Самозаклинювальні гальма		x_{42}	0,98	0,0101	350
Механізм гальмування рулону	Стрічковий	x_5	x_{51}	0,98	0,0204	640
	Дисковий		x_{52}	0,99	0,0101	360
	Важільний		x_{53}	0,98	0,0204	460
Рукавоутворювач	Комірцевого типу	x_6	x_{61}	0,99	0,0101	3540
	Без коміра		x_{62}	0,99	0,0101	3100
Пристрій поздовжнього зварювання	Зварний ролик	x_7	x_{71}	0,98	0,0204	9200
	Зварна губка		x_{72}	0,99	0,0101	9380
Пристрій поперечного зварювання	Губки зварювання термоконтактні	x_8	x_{81}	0,98	0,0204	10100
	Губки зварювання термоімпульсні		x_{82}	0,97	0,0309	12040
Механізм протягування рукава	Ролики	x_9	x_{91}	0,96	0,0417	2300
	Сектори		x_{92}	0,97	0,0309	1800
	Стрічковий механізм		x_{93}	0,98	0,0204	2400
Механізм відрізання	Відрізні ножі	x_{10}	x_{101}	0,99	0,0309	1470
	Відрізні ротори		x_{102}	0,98	0,0204	2100
Датувальний пристрій	Термодрукуючий	x_{11}	x_{111}	0,98	0,0204	2370
	Лазерного друку		x_{112}	0,99	0,0101	3100
	Краплеструминного друку		x_{113}	0,97	0,0309	3500

Робота програми починається із внесення в неї переліку функції, які передбачені технологічною операцією пакування (рис. 4.9, *а*), переліку ФМ, критеріїв оптимізації структури ПМ та їх числових значень для кожного ФМ (рис. 4.9, *б*), які у сукупності формують базу початкових даних (рис. 4.9, *в*).

Наступною дією є задання команди “**Розрахунок”**. У діалоговому вікні, що з’являється на екрані, необхідно вибрати потрібні функції і для виконання обчислень натиснути на кнопку “**Розрахунок”** у цьому ж вікні (рис. 4.9, *г*)**.**

Після цього програма розраховує всі можливі варіанти структури ПМ по заданих критеріях. Результат розрахунку представляється у вигляді таблиці, яка відображає кількість варіантів, перелік ФМ, надійність, виражену коефіцієнтом $K_{ВГ}$ та загальну

вартість (рис. 4.10, *а*). Для більшої наочного сприйняття результатів слід натиснути кнопку “**Графік залежності**”, яка виводить графік у декартовій системі координат (рис. 4.10, *б*), що відображає у вигляді точок розв’язки по кожному отриманому варіанту структури ПМ. При натисненні на будь-яку точку виводиться вся інформація по да-

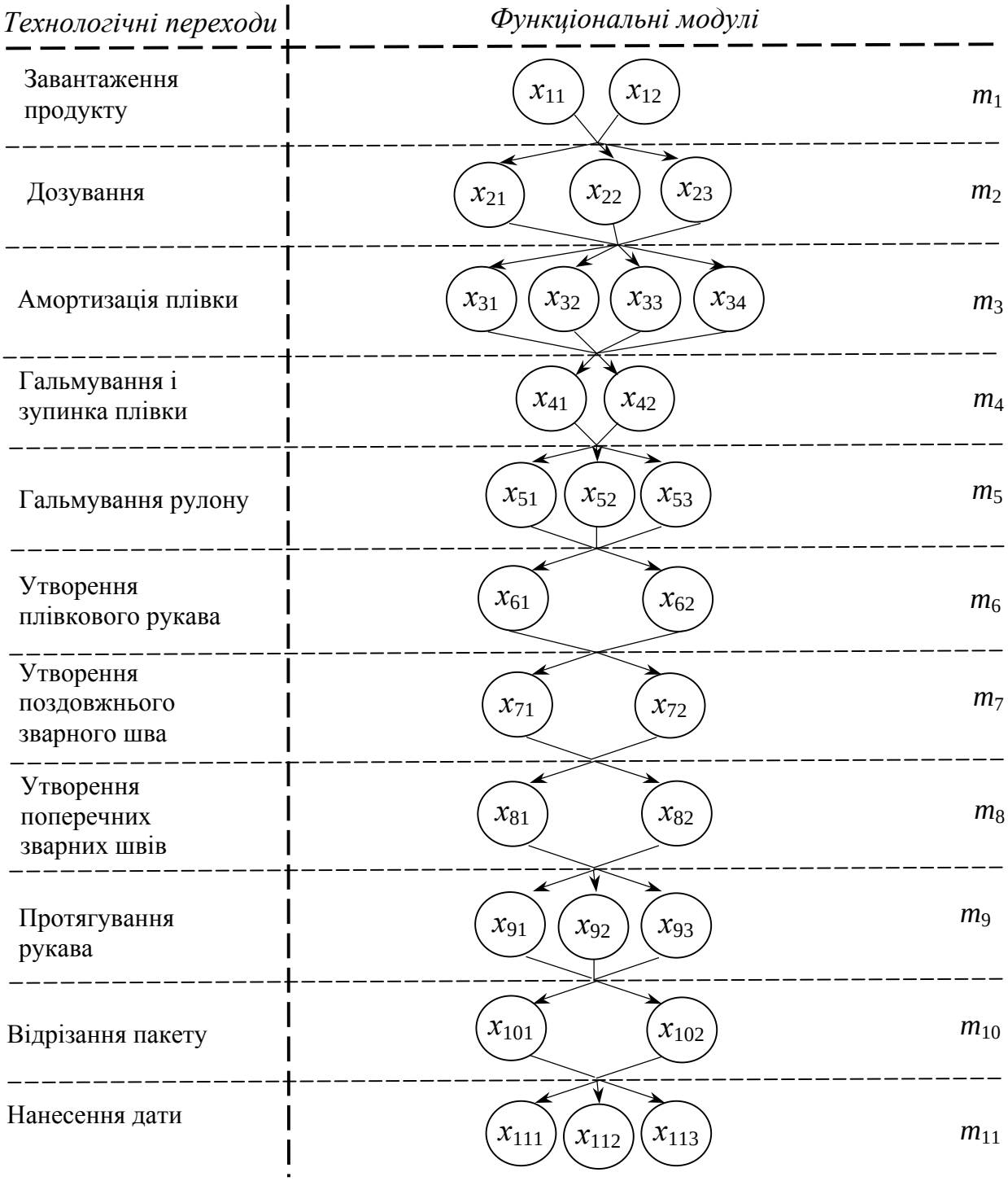
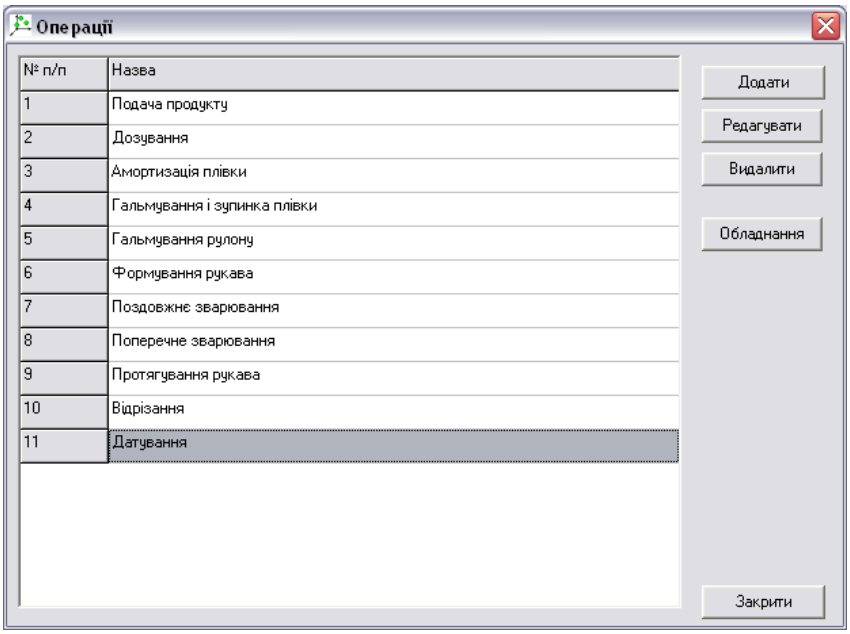
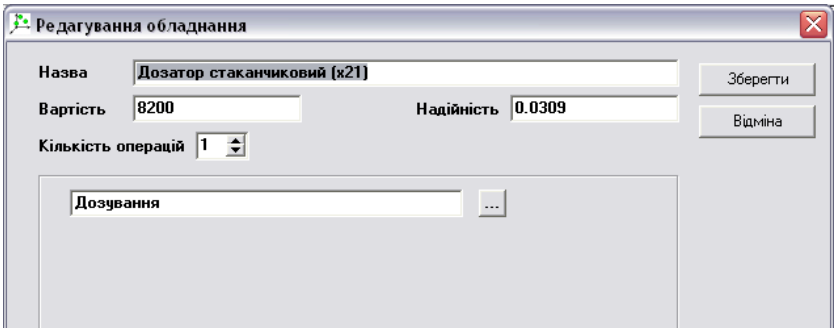


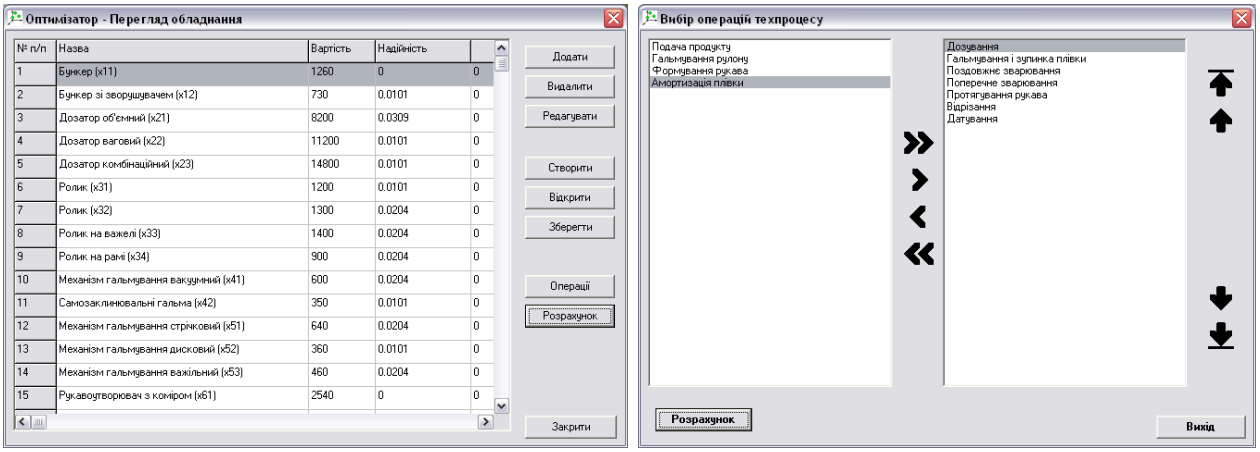
Рис. 4.8. Граф логічних зв’язків між функціональними модулями



а



б

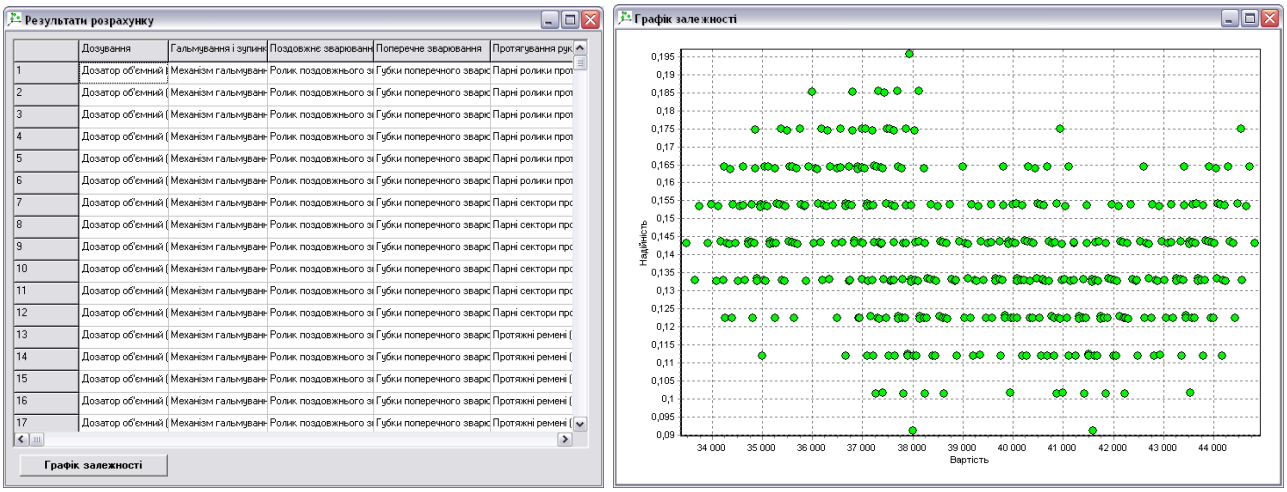


в

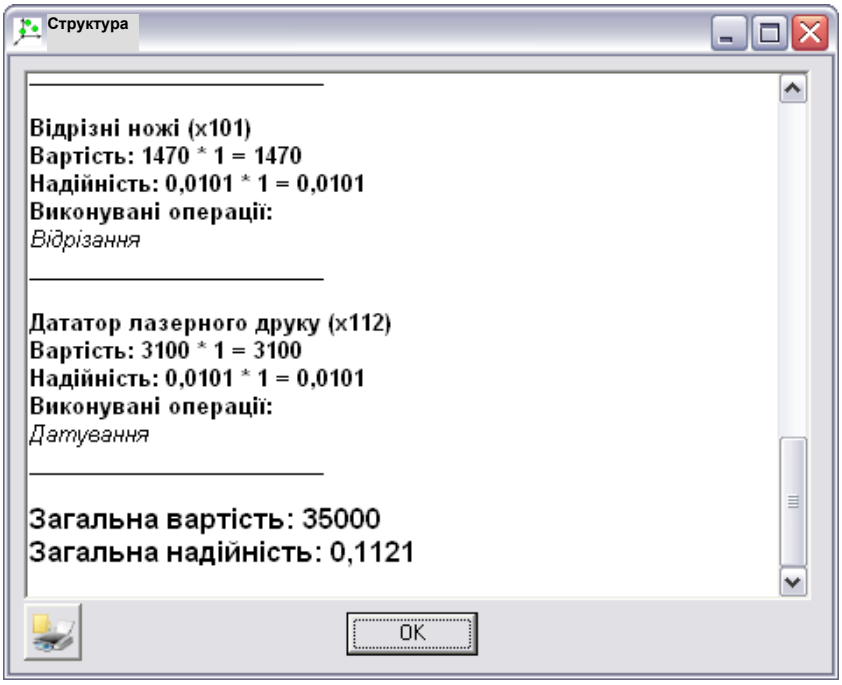
Рис. 4.9. Формування бази вихідних даних: *а* – перелік функцій; *б* – перелік функціональних модулів; *в* – база даних

ному варіанту структури: перелік ФМ, їх показники, а також сумарне числове значення вартості ПМ та її надійності.

Оптимальним вважається результат, що має мінімальне значення як по вартості, так і по надійності у порівнянні з іншими. Для даного прикладу задачі таким розв'язком є варіант, представлений на рис. 4.10, *в*.



а *б*



в

Рис. 4.10. Отримані результати розв'язання задачі: *а* – перелік допустимих варіантів структури пакувальної машини; *б* – графік залежності числових значень по сумарній вартості та надійності; *в* – інформація по точці графіка

Блок-схема алгоритму програми “Оптимізатор” подана в на рис. 4.11.

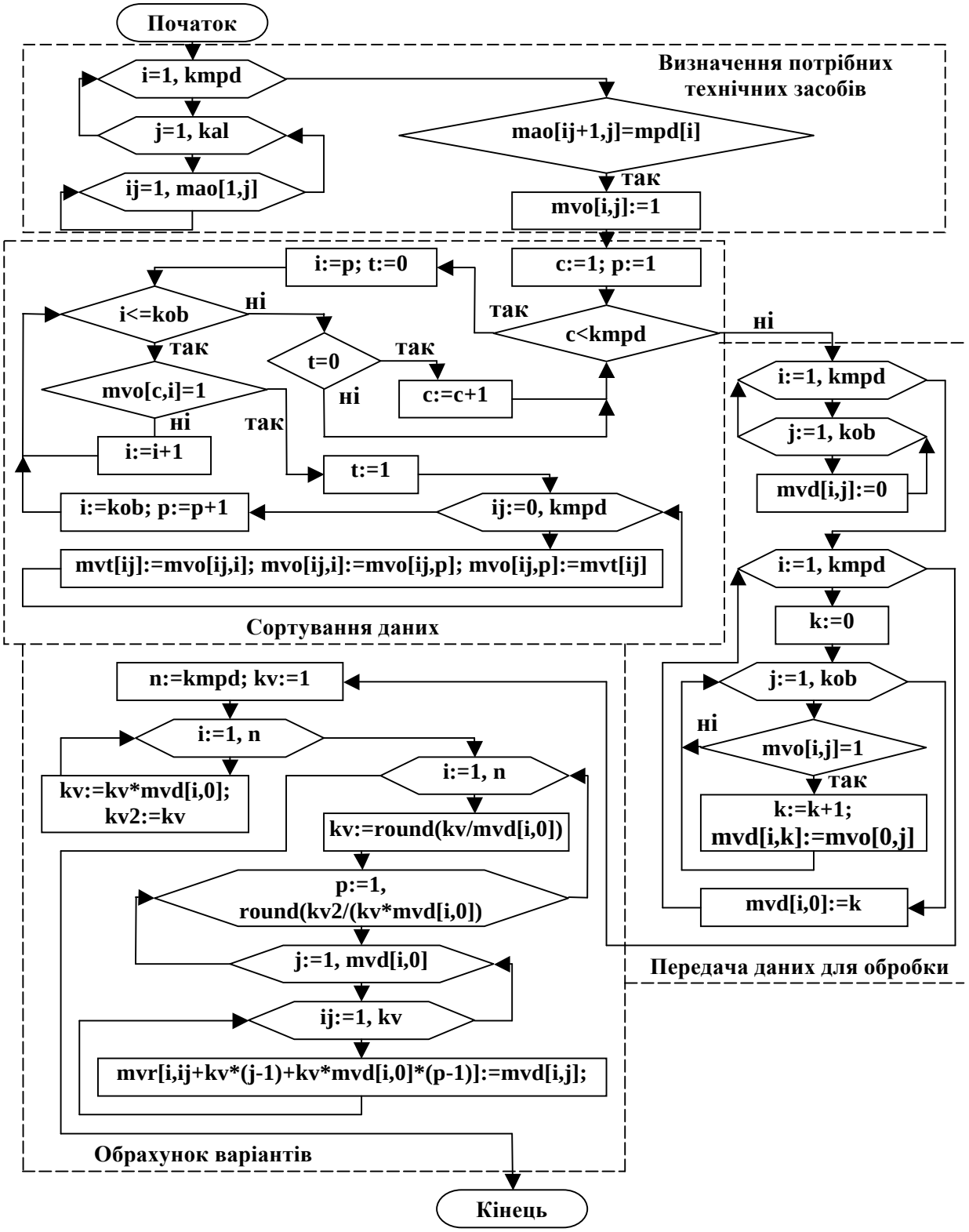


Рис. 4.11. Блок-схема програми “Оптимізатор”

4.6. Багатокритеріальний оптимізаційний синтез функціонально-модульної структури машини пошуком Парето-ефективних рішень

Перейдемо до вирішення задачі оптимізації структури машини для пакування сипких речовин методом пошуку Парето-ефективних рішень. Складність структурної будови ПМ та зростаюча різноманітність типорозмірів ФМ робить знаходження оптимального варіанта компонування машини досить трудомістким процесом. Ця задача ускладнюється ще більше, коли йдеться про розв’язування багатокритеріальної задачі оптимізації структури ПМ. Така проблема зумовлює необхідність у здійсненні процедур генерування варіантів компонувань ПМ та розрахунків по них за критеріями оптимальності в автоматизованому режимі.

Для забезпечення цієї можливості та підвищення якісного рівня проектування ПМ автором розроблено спеціальну програму “Optimum-3D” в середовищі Delphi 7, яка працює за принципом пошуку Парето-ефективних рішень [76] та дозволяє здійснювати пошук розв’язків задачі оптимізації у тривимірному просторі, розширюючи тим самим кількість критеріїв, за якими можна одночасно проводити оцінку компонувань ПМ.

Програма дозволяє проектанту самостійно вводити початкові дані для розв’язання конкретної задачі, а саме – задавати перелік ФМ та обирати критерії оптимальності для оцінки якості ПМ.

Нижче наведено приклад розв’язування задачі оптимізаційного синтезу машини для пакування сипких речовин за такими критеріями як вартість, надійність та енерговитрати, яким характеризується кожен прийнятий до розгляду ФМ (табл. 4.4).

Завдання полягає в знаходженні такого варіанту компонування ПМ, щоб виконувались усі технологічні переходи операції пакування, причому надійність ПМ в цілому була максимально високою, а вартість та енерговитрати – мінімально низькими. Оскільки по першому критерію маємо задачу максимізації, а по двох інших – мінімізації, їх потрібно звести до функції мети з однаковим екстремумом.

Енерговитрати визначимо із врахуванням споживаної потужності кожного ФМ за формулою:

$$E_з = N_i \cdot T,$$

де E_i – енергія, витрачена i-тим ФМ за час T, *Дж*;

N_i – потужність i-го ФМ, *Вт*;

T – час, необхідний для виготовлення однієї упаковки, *с*:

$$T = \frac{1}{Q_ö}.$$

Отже, при 1 *кВт·с* = 1000 *Вт* · 1 *с* = 1 *МДж* та заданій продуктивності автомата – $Q_ц$ = 30 уп./хв:

$$T = \frac{60\ сек}{30\ уп} = 2\ сек,$$

отримаємо співвідношення

$$E_i = 2N_i.$$

Таблиця 4.4

Вихідні дані для автоматизованого розв'язку задачі оптимізації структури машини для пакування сипких речовин методом пошуку Парето-ефективних рішень

Назва ФМ		Позначення ФМ	Варіант конструкції ФМ	Критерії оптимізації			
				Споживана потужність (*N*), *кВт*	Енерговитрати (*E*), *МДж*	Надійність *KBIi*	Вартість (*vi*)
Бункер	Зі зворушувачем	*x*1	*x*11	0,1	0,2	0,0204	1260
	Без зворушувача		*x*12	0	0	0,0101	730
Дозатор	Об'ємний	*x*2	*x*21	0,5	1	0,0309	8200
	Ваговий		*x*22	0,55	1,1	0,0101	11200
	Комбінаційний		*x*23	0,6	1,2	0,0101	14800
Механізм амортизації плівки	Ролик, що обертається на осі	*x*3	*x*31	0,02	0,04	0,0101	1200
	Ролик, що рухається поступально		*x*32	0,03	0,06	0,0204	1300
	Ролик, встановлений на коливному важелі		*x*33	0,06	0,12	0,0204	1400
	Ролик, закріплений на рамі		*x*34	0,04	0,08	0,0101	900
Механізм гальмування і зупинки плівки	Вакуумний	*x*4	*x*41	0	0	0,0204	600
	Самозаклинювальні гальма		*x*42	0	0	0,0101	350
Механізм гальмування рулону	Стрічковий	*x*5	*x*51	0	0	0,0204	640
	Дисковий		*x*52	0	0	0,0101	360
	Важільний		*x*53	0	0	0,0204	460

Продовження табл. 4.4

Рукавоутворювач	Комірцевого типу	*x*6	*x*61	0	0	0,0101	2540
	Без коміра		*x*62	0	0	0,0101	2100
Пристрій поздовжнього зварювання	Зварний ролик	*x*7	*x*71	0,43	0,86	0,0204	9200
	Зварна губка		*x*72	0,54	1,08	0,0101	9380
Пристрій поперечного зварювання	Зварні губки (ЗГ)	*x*8	*x*81	0,35	0,7	0,0204	10100
	ЗГ з механізмом відрізання		*x*82	0,47	0,94	0,0309	12040
	ЗГ з механізмом протяжки		*x*83	0,34	0,68	0,0309	13200
	ЗГ з вмонтованим дататором		*x*84	0,48	0,96	0,0204	11900
	ЗГ з механізмами протяжки і відрізання		*x*85	0,4	0,8	0,0204	14020
	ЗГ з механізмом відрізання і вмонтованим дататором		*x*86	0,43	0,86	0,0417	12500
	ЗГ з механізмом протяжки і вмонтованим дататором		*x*87	0,5	1	0,0526	13900
	ЗГ з механізмами протяжки, відрізання і вмонтованим дататором		*x*88	0,24	0,48	0,0757	14600
Механізм протягування рукава	Парні ролики	*x*9	*x*91	0,25	0,5	0,0417	2300
	Парні сектори		*x*92	0,2	0,4	0,0309	1800
	Протяжні ремені		*x*93	0,3	0,6	0,0204	2400
Механізм відрізання	Відрізні ножі	*x*10	*x*101	0,1	0,2	0,0309	1470
	Відрізні ротори		*x*102	0,2	0,4	0,0204	2100
Датувальний пристрій	Термодрукуючий	*x*11	*x*111	0,08	0,16	0,0204	2370
	Лазерного друку		*x*112	0,04	0,08	0,0101	3100
	Краплеструминного друку		*x*113	0,02	0,04	0,0309	3500

Для цього використаємо запропонований нами коефіцієнт відносної готовності $K_{ВГ}$.

Отримані в результаті розрахунку значення енерговитрат по кожному ФМ занесені в табл. 4.4. Граф зв'язків ФМ приведено на рис. 4.12.

Розглянемо послідовність роботи програми.

Після запуску програми з'являється головне вікно, за допомогою якого можна отримати доступ до її основних функцій, зокрема за допомогою пункту меню "***Файл***" можна створити нову базу даних, відкрити вже існуючу, зберегти виконані зміни або ж завершити роботу з програмою.

Після вибору підпункту "***Новий***" відкриється діалогове вікно по створенню бази даних. В ньому потрібно вказати кількість ФМ, кількість варіантів конструкції кожного із заданого числа ФМ, задати кількість критеріїв, за якими буде проводитись оцінка, а також

умовно позначити кожен з критеріїв. Далі необхідно заповнити таблицю, що з'являється на екрані (рис. 4.13), відповідними значеннями критеріїв по кожному ФМ, що позначені як E*ij* .

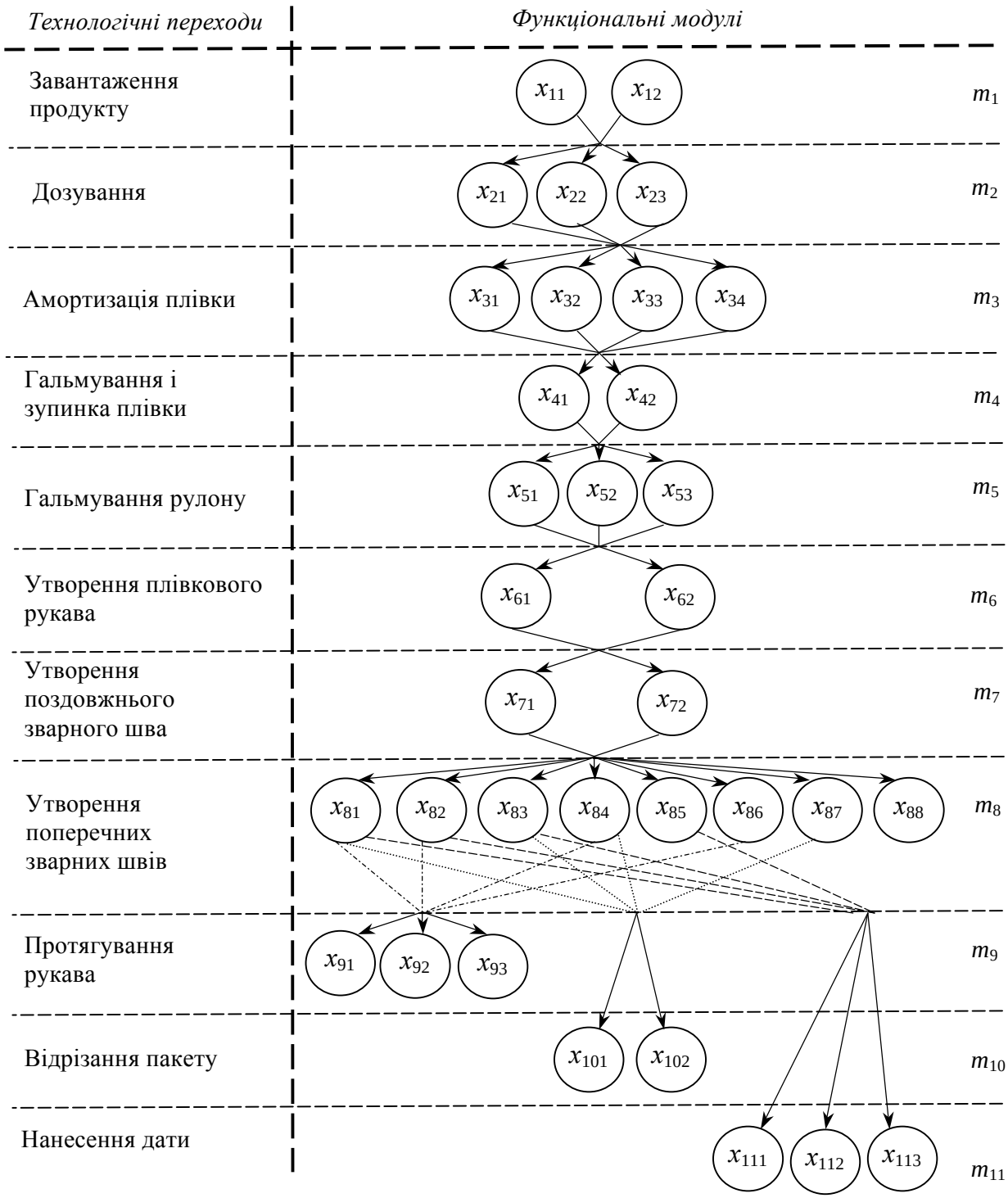


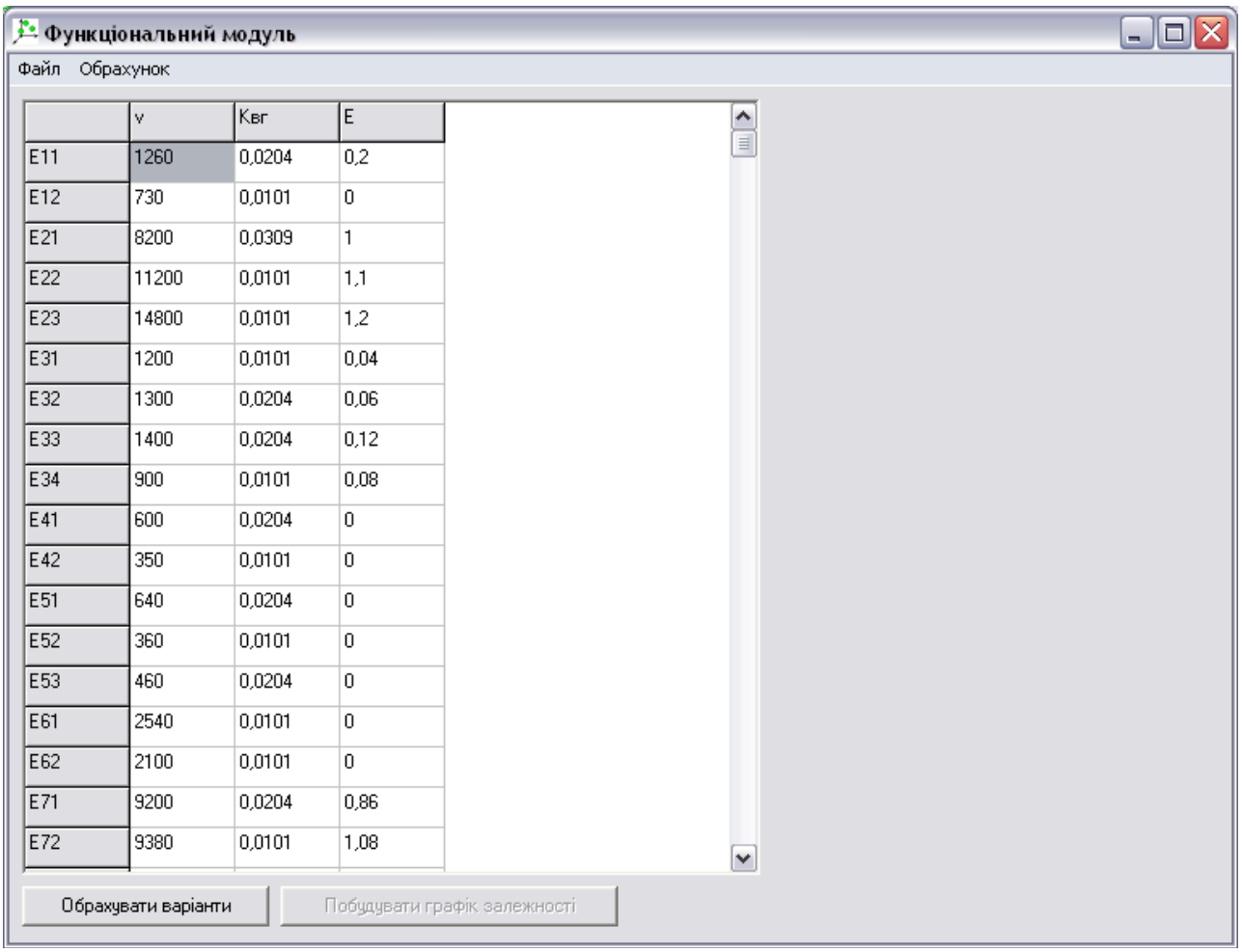
Рис. 4.12. Граф логічних зв'язків між функціональними модулями

Якщо є вже готова база даних, то її можна завантажити в програму за допомогою меню "***Файл – Відкрити***".

Наступним кроком є зазначення логічних зв'язків між ФМ. Під логічним зв'язком слід розуміти умову, яка виключає можливість наявності у складі ПМ більше одного ФМ, який виконує визначену функцію. Це повинно враховуватись при розгляді ФМ, конструкція яких передбачає виконання, крім основної функції, додаткових.

Тож якщо серед ФМ є такі, що взаємозамінюються між собою, то їх можна вказати, виконавши наступні дії:

1. Вибрати пункт меню "***Обрахунок – Логічні зв'язки***".
2. За допомогою випадаючих списків вибрати елементи (типорозміри ФМ), які несумісні між собою.



	v	Квг	E
E11	1260	0,0204	0,2
E12	730	0,0101	0
E21	8200	0,0309	1
E22	11200	0,0101	1,1
E23	14800	0,0101	1,2
E31	1200	0,0101	0,04
E32	1300	0,0204	0,06
E33	1400	0,0204	0,12
E34	900	0,0101	0,08
E41	600	0,0204	0
E42	350	0,0101	0
E51	640	0,0204	0
E52	360	0,0101	0
E53	460	0,0204	0
E61	2540	0,0101	0
E62	2100	0,0101	0
E71	9200	0,0204	0,86
E72	9380	0,0101	1,08

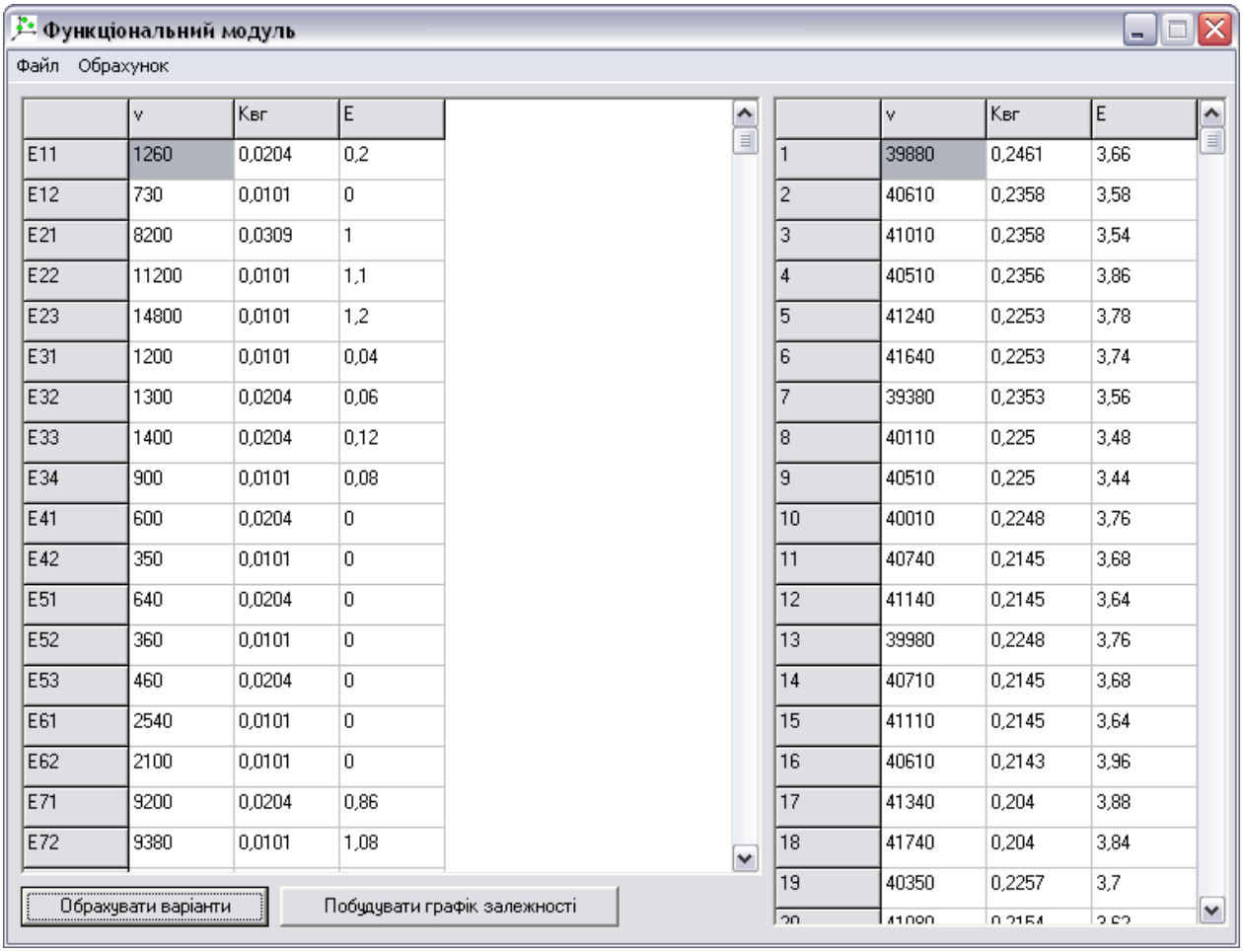
Рис. 4.13. Вікно вводу числових даних та обрахунку варіантів (*E* в МДж, *v* в грн., *КВГ*)

Після натиснення кнопки "***Обрахувати варіанти***" в правій частині вікна програми з'явиться таблиця зі всіма результатами роз-

рахунку (рис. 4.14), тобто сумами числових значень по кожному критерію, що відповідають певному варіанту розв'язку задачі.

Щоб наочно відобразити результати розрахунку, потрібно натиснути кнопку "***Побудувати графік залежності***". У вікні, що відкриється, слід присвоїти осям координат потрібний діапазон значень. Для цього використовуються випадаючі списки, розміщені в лівому верхньому (вісь Z), лівому нижньому (вісь X) та правому нижньому (вісь Y) кутках вікна програми (рис. 4.15).

Після виконання вказаних дій графік залежності представлятиме собою декартову систему координат, осі якої відповідають обраним оператором критеріям оптимальності, а множина точок відображає значення критеріїв для того чи іншого варіанта структури машини.



	v	Квг	E
E11	1260	0,0204	0,2
E12	730	0,0101	0
E21	8200	0,0309	1
E22	11200	0,0101	1,1
E23	14800	0,0101	1,2
E31	1200	0,0101	0,04
E32	1300	0,0204	0,06
E33	1400	0,0204	0,12
E34	900	0,0101	0,08
E41	600	0,0204	0
E42	350	0,0101	0
E51	640	0,0204	0
E52	360	0,0101	0
E53	460	0,0204	0
E61	2540	0,0101	0
E62	2100	0,0101	0
E71	9200	0,0204	0,86
E72	9380	0,0101	1,08

	v	Квг	E
1	39880	0,2461	3,66
2	40610	0,2358	3,58
3	41010	0,2358	3,54
4	40510	0,2356	3,86
5	41240	0,2253	3,78
6	41640	0,2253	3,74
7	39380	0,2353	3,56
8	40110	0,225	3,48
9	40510	0,225	3,44
10	40010	0,2248	3,76
11	40740	0,2145	3,68
12	41140	0,2145	3,64
13	39980	0,2248	3,76
14	40710	0,2145	3,68
15	41110	0,2145	3,64
16	40610	0,2143	3,96
17	41340	0,204	3,88
18	41740	0,204	3,84
19	40350	0,2257	3,7
20	41080	0,2154	3,62

Рис. 4.14. Розрахунок значень критеріїв по допустимих варіантах компонувань

При натисненні курсором на будь-яку точку ОДР з'являються її координати (сумарні числові значення по кожному з критеріїв) та перелік елементів (ФМ) по даному результату.

Щоб розбити тривимірний графік на площини з можливістю перегляду кожної з них (рис. 4.16 – 4.18) необхідно зняти опцію ***3D*** у верхній частині вікна.

Для сполучення потрібних точок (виділення Парето-множини) на графіку необхідно: викликати меню правою клавішею мишки, вибрати пункт "***Додати лінію***", позначити потрібні точки на графіку, викликати меню правої клавіші мишки і вибрати пункт "***Завершити***".

Множиною Парето D_X^* на кожному з графіків (рис. 4.16 – 4.18) буде сукупність сполучених лініями точок, які займають крайнє ліве нижнє положення, що передбачено постановкою задачі.

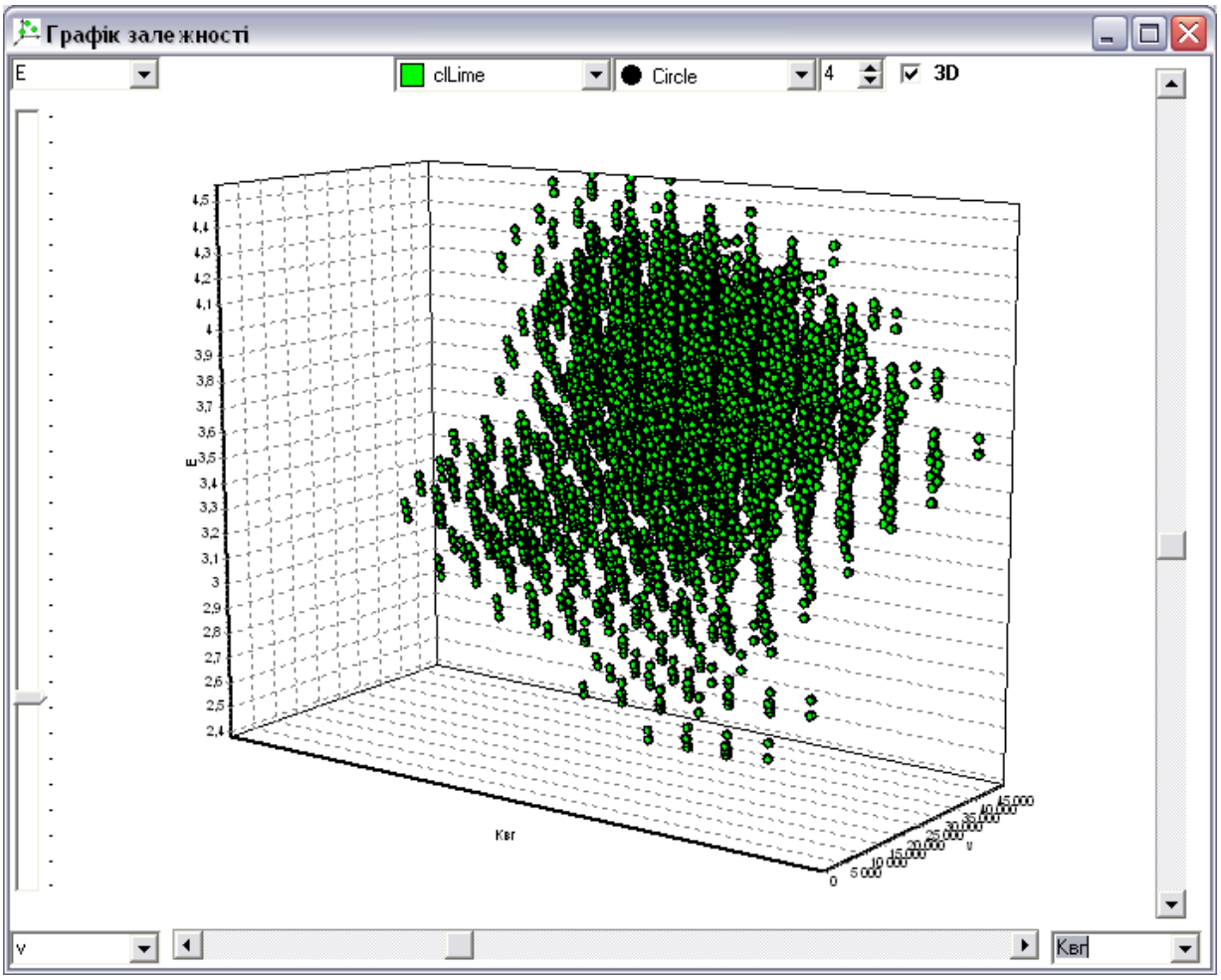


Рис. 4.15. Тривимірний графік залежності критеріїв оптимальності

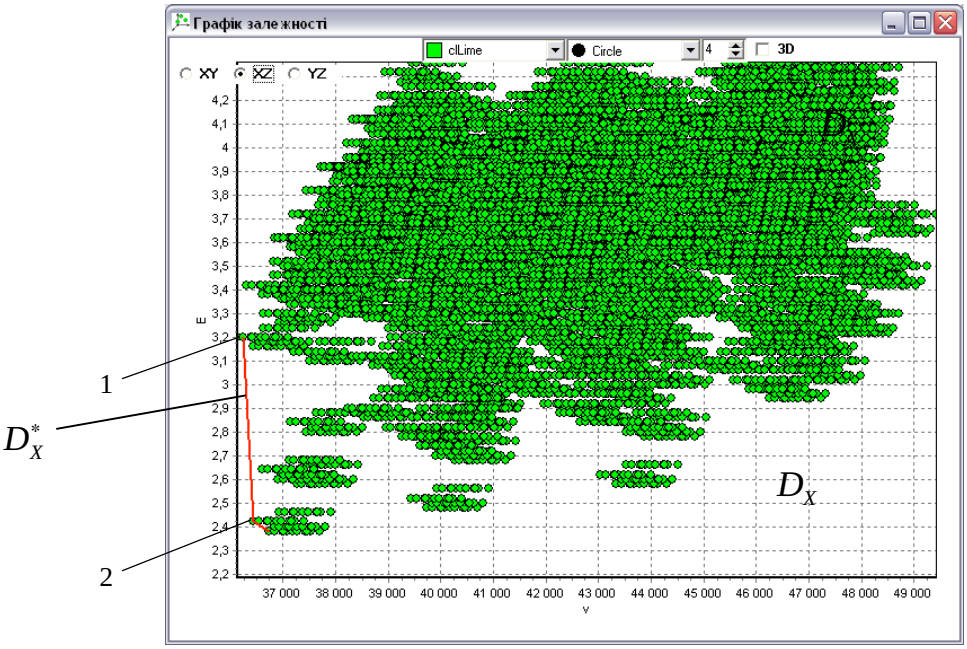


Рис. 4.16. Проекція ОДР та Парето-множини на площину “EV”, для якої варіанти структур становлять:
в **т. 1** – {E_{12}, E_{21}, E_{34}, E_{42} , E_{52}, E_{62}, E_{71}, E_{88}};
в **т. 2** – {E_{12}, E_{21}, E_{31}, E_{42} , E_{52}, E_{62}, E_{71}, E_{88}}

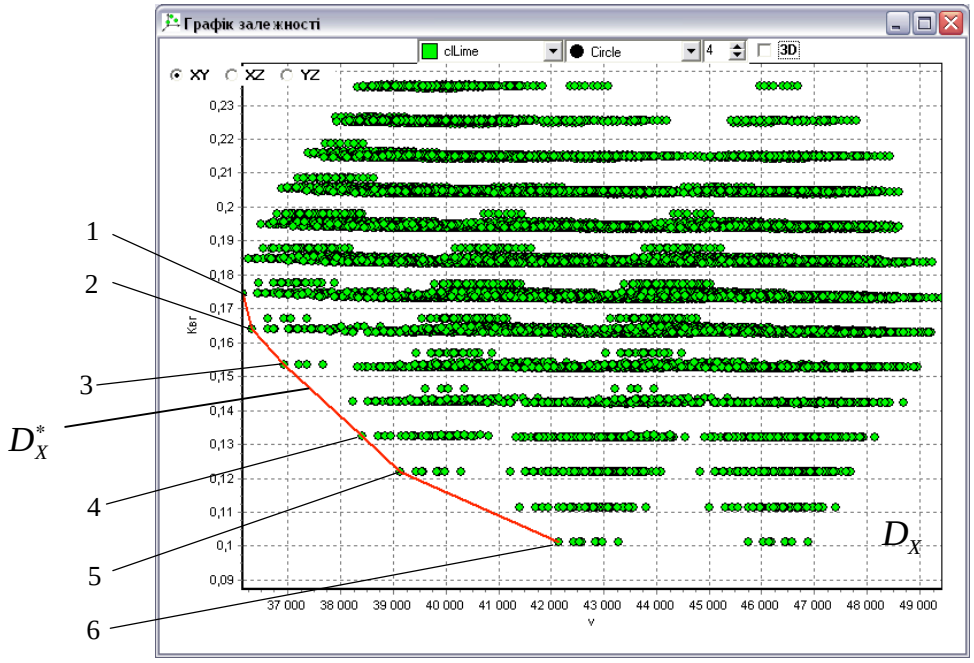


Рис. 4.17. Проекція ОДР та Парето-множини на площину “$К_{ВГ}$V”, для якої варіанти структур становлять:
в **т. 1** – {E_{12}, E_{21}, E_{34}, E_{42} , E_{52}, E_{62}, E_{71}, E_{86}, E_{92}};
в **т. 2** – {E_{12}, E_{21}, E_{34}, E_{42} , E_{52}, E_{62}, E_{72}, E_{86} , E_{92}};
в **т. 3** – {E_{12}, E_{21}, E_{34}, E_{42} , E_{52}, E_{62}, E_{72}, E_{86} , E_{93}};
в **т. 4** – {E_{12}, E_{21}, E_{34}, E_{42} , E_{52}, E_{62}, E_{72}, E_{85}, E_{111}};
в **т. 5** – {E_{12}, E_{21}, E_{34}, E_{42} , E_{52}, E_{62}, E_{72}, E_{85} , E_{112}};
в **т. 6** – {E_{12}, E_{22}, E_{34}, E_{42} , E_{52}, E_{62}, E_{72}, E_{85}, E_{112}}

Очевидно, що Парето-множина лише звужує коло пошуку оптимального розв'язку, однак не дає остаточного результату. Як видно з рис. 4.16 – 4.18, деякі точки Парето-множини проектуються одразу на 2 площини, тому сумарно вона налічує в собі 7 точок із ОДР. Відповідні їм варіанти структури ПМ позначимо *Xi* (табл. 4.5). Завданням проектанта є вибір кращого варіанта шляхом перебору точок, що належать множині Парето.

Для цього слід перейти до математичних розрахунків інтегрального критерію оптимальності.

Найбільш простим у даному випадку є пошук значень *адитивного критерію* оптимальності. Для їх визначення для кожного варіанту розв'язку задачі необхідно для кожного значення часткових критеріїв задати вагові коефіцієнти *Ci*. Здійснимо присвоєння вагових коефіцієнтів за принципом наростання значень часткових критеріїв (табл. 4.6).

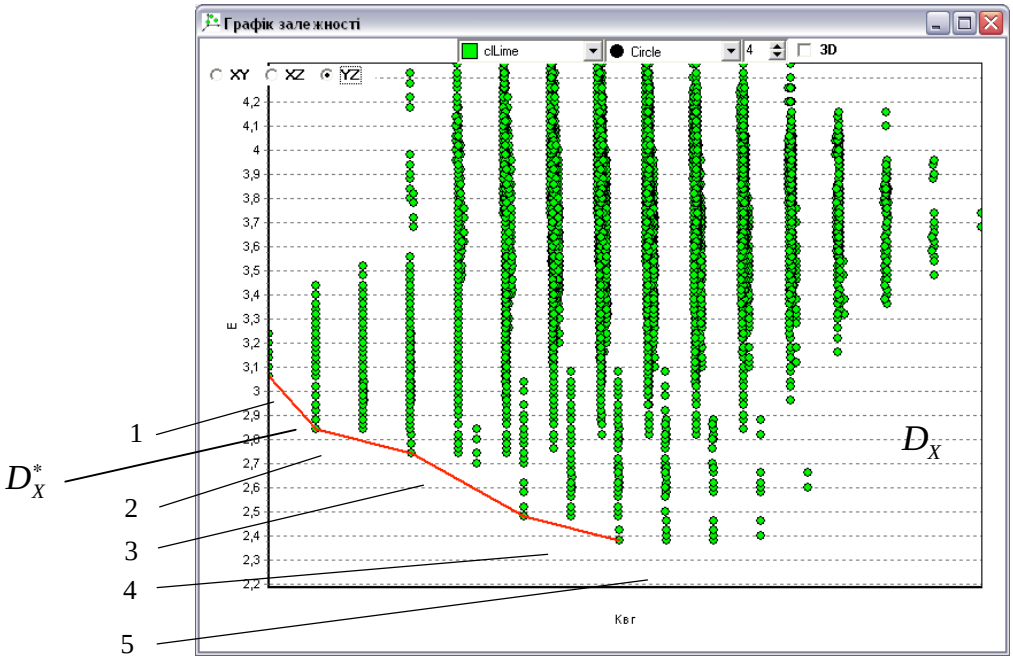


Рис. 4.18. Проекція ОДР та Парето-множини на площину "$ЕК_{ВГ}$", для якої варіанти структур становлять:
в **т. 1** – {E_{12}, E_{22}, E_{31}, E_{42}, E_{52}, E_{61}, E_{71}, E_{88}};
в **т. 2** – {E_{12}, E_{21}, E_{34}, E_{42}, E_{52}, E_{61}, E_{71}, E_{88}};
в **т. 3** – {E_{12}, E_{21}, E_{32}, E_{42}, E_{52}, E_{61}, E_{71}, E_{88}}

Таблиця 4.5

Значення критеріїв оптимізації для варіантів структур машини для пакування сипких речовин

Варіант структури ПМ / Критерій	*X*1	*X*2	*X*3	***X*4**	*X*5	*X*6	*X*7
Надійність (*K*вг)	0,2058	0,1845	0,2163	**0,2089**	0,2194	0,1876	0,1981
Енерговитрати (*E*)	2,8515	2,9265	2,7915	**2,6415**	2,5815	2,7165	2,6565
Вартість (*v*)	44200	46260	44380	**44740**	44920	46800	46980

Таблиця 4.6

Оцінка варіантів структур пакувального автомату за критеріями оптимізації

Критерій	Оцінки варіантів структур пакувальної машини						
	*X*1	*X*2	*X*3	*X4*	*X*5	*X*6	*X*7
Ненадійність (*K*вг)	3	1	5	*4*	6	2	7
Енерговитрати (*E*)	6	7	5	*2*	1	4	3
Вартість (*v*)	1	5	2	*3*	4	6	7

Отже, підставивши відповідні дані, одержимо:

$$F(X^1)=\left(3\frac{0,2058}{0,1845}\right)+\left(6\frac{2,8515}{2,5815}\right)+\left(1\frac{44200}{44200}\right)=10,97;$$

$$F(X^2)=\left(1\frac{0,1845}{0,1845}\right)+\left(7\frac{2,9265}{2,5815}\right)+\left(5\frac{46260}{44200}\right)=14,16;$$

$$F(X^3)=\left(5\frac{0,2163}{0,1845}\right)+\left(5\frac{2,7915}{2,5815}\right)+\left(2\frac{44380}{44200}\right)=13,27;$$

$$F(X^4)=\left(4\frac{0,2089}{0,1845}\right)+\left(2\frac{2,6415}{2,5815}\right)+\left(3\frac{44740}{44200}\right)=9,56;$$

$$F(X^5)=\left(6\frac{0,2194}{0,1845}\right)+\left(1\frac{2,5815}{2,5815}\right)+\left(4\frac{44920}{44200}\right)=12,1;$$

$$F(X^6)=\left(2\frac{0,1876}{0,1845}\right)+\left(4\frac{2,7165}{2,5815}\right)+\left(6\frac{46800}{44200}\right)=12,58;$$

$$F(X^7)=\left(7\frac{0,1981}{0,1845}\right)+\left(3\frac{2,6515}{2,5815}\right)+\left(7\frac{46980}{44200}\right)=18.$$

Це означає, що оптимальною буде структура ПМ у складі:

*X*4 = {E11 , E23 , E31 , E41 , E51 , E61, E71 , E88}.

Узагальнена блок-схема алгоритму програми “Optimum-3D” показана на рис. 4.19.

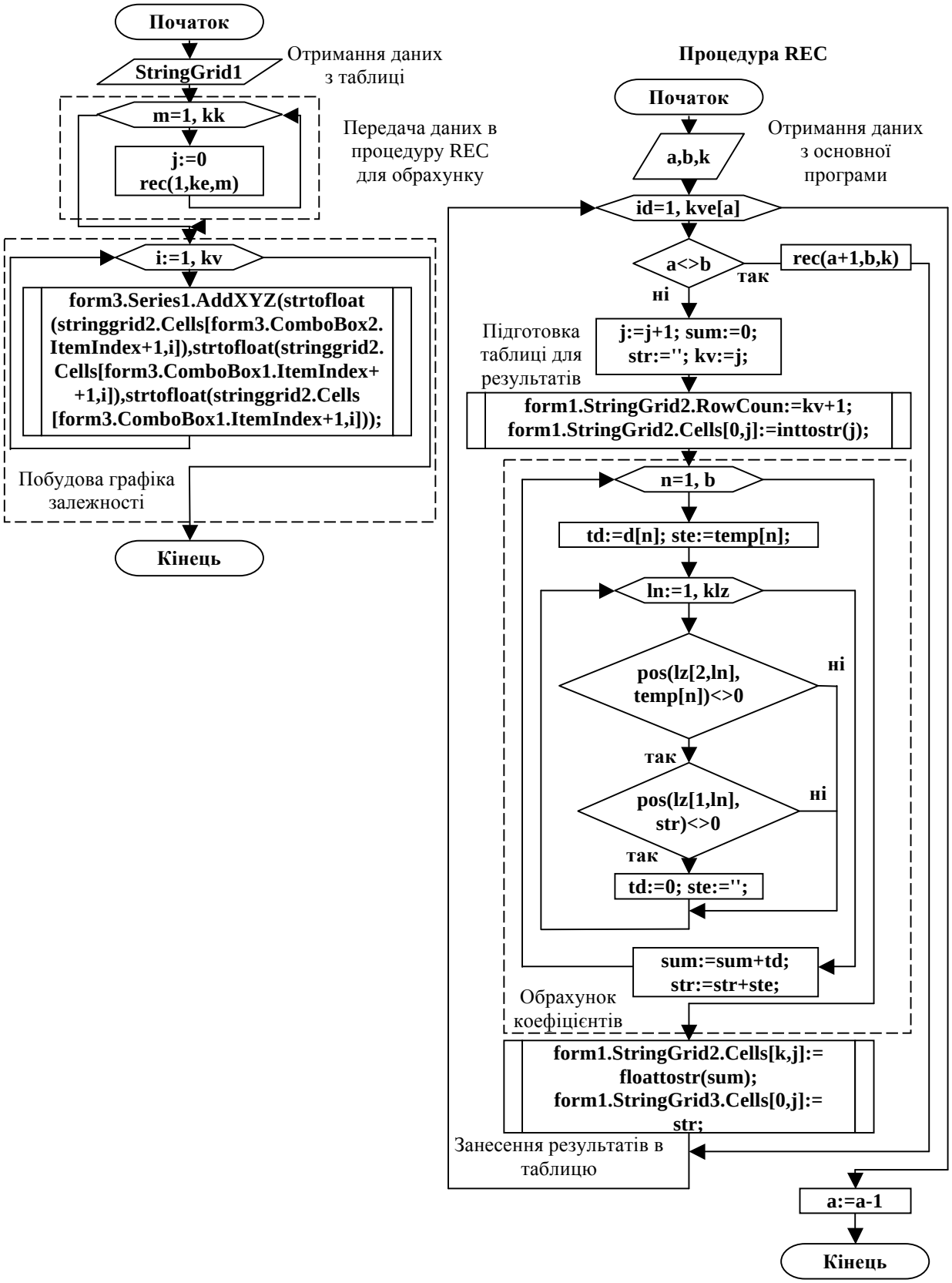


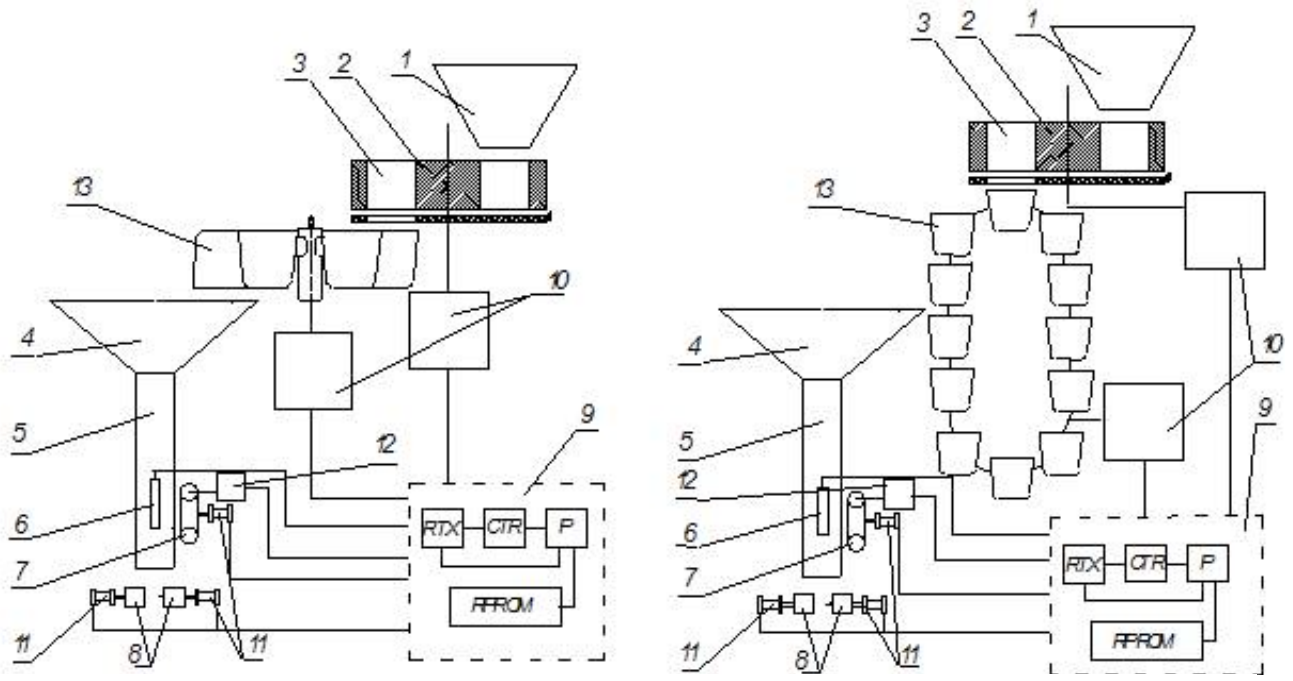
Рис. 4.19. Узагальнена блок-схема алгоритму розрахунку задачі оптимізації структури технологічної машини

РОЗДІЛ 5. Приклади оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури машин для пакування сипких речовин

5.1. Машина функціонально-модульної будови для пакування сипких речовин з гнучким зв'язком між її компонентами

Дослідження роботи машин для пакування сипких речовин у виробничих умовах показало, що зниження їх надійності зумовлене відмовами як дозувально-фасувального, так і пакувального БФМ.

Підвищення надійності, як вже зазначалось, можливо досягти гнучким зв'язком, що забезпечується проміжними накопичувачами. Даний вид зв'язку запобігає простоюванням машини через відмову певного ФМ завдяки можливості нагромадження виробів між робочими позиціями.



а *б*

Рис. 5.1. Схеми варіантів компонувань машин для пакування сипких речовин з проміжними накопичувачами: а)карусельного типу; б) конвеєрного типу: 1 – бункер; 2 – дозатор; 3 – мірка; 4 – приймальний бункер; 5 – формувальна труба; 6 – губки зварювання поздовжнього шва пакета; 7 – механізм протягування рукава; 8 – губки зварювання поперечних швів пакета; 9 – блок керування; 10 – електродвигуни; 11 – пневмоциліндри; 12 – привід переміщення рукава; 13 – проміжний накопичувач

На основі застосування методів оптимізаційного синтезу компонувальних схем [71] машин для пакування сипких речовин та проведеного аналізу їх модульної структури розроблено компонувальні схеми ПМ з проміжним накопичувачем відміряних доз сипкої речовини, розміщеним між дозувально-фасувальним та пакувальним БФМ (рис. 5.1, *а*,*б*) [45].

На основі схеми, зображеної на рис. 5.1, *а* спроектовано конструкцію фасувально-пакувальної машини (рис. 5.2), яка складається із дозувально-фасувального БФМ, до складу якого входять завантажувальний бункер 1, дозатор 2, рама 3 проміжний накопичувач 4 відміряних доз; пакувальний блок, що включає в себе механізм подачі плівки 5, формувальну трубу 6 з прикріпленим до її верхньої частини приймальним бункером 7 та механізм формування пакету, що має в своєму складі механізм поздовжнього зварювання 8, механізм протяжки 9, механізм поперечного зварювання 10; пристрій для контролю виходу готового пакета 11, блок керування 12, зв’язаного з давачами *а* та *с*, що закріплені на корпусі машини.

Накопичувач 4 виконаний у вигляді поворотної каруселі на валу 13, із встановленими по її периметру з однаковим кроком кишенями 14 (рис. 5.3) для розміщення відміряних доз сипкого матеріалу, закріпленими на осях 15, що жорстко приєднані до вала 13. Накопичувач 4 розташований між дозувально-фасувальним і пакувальним БФМ таким чином, щоб кожна кишеня 14 при завантаженні в неї дози знаходилась під дозатором 2, а при вивантаженні з неї дози – над входом в формувальну трубу 6. Кожна кишеня 14 виконана у вигляді перекидного стакана з дном, який має привід повороту 16 для перевертання навколо осі 15 в положення дном вниз та дном вгору, і давач положення *b*, зв’язаний з блоком керування 12. Карусель має дві робочі позиції: А – завантаження кишені, Б – розвантаження кишені, та позицію Д – контролю положення кишені.

Пристрій для контролю виходу готового пакету з машини 11 складається з пластини 17, яка обертається навколо вала 18 і з’єднана із пружиною 19, яка прикріплена до опори 20 (рис. 5.4).

Блок керування оснащений індикатором кількості вільних кишень 21.

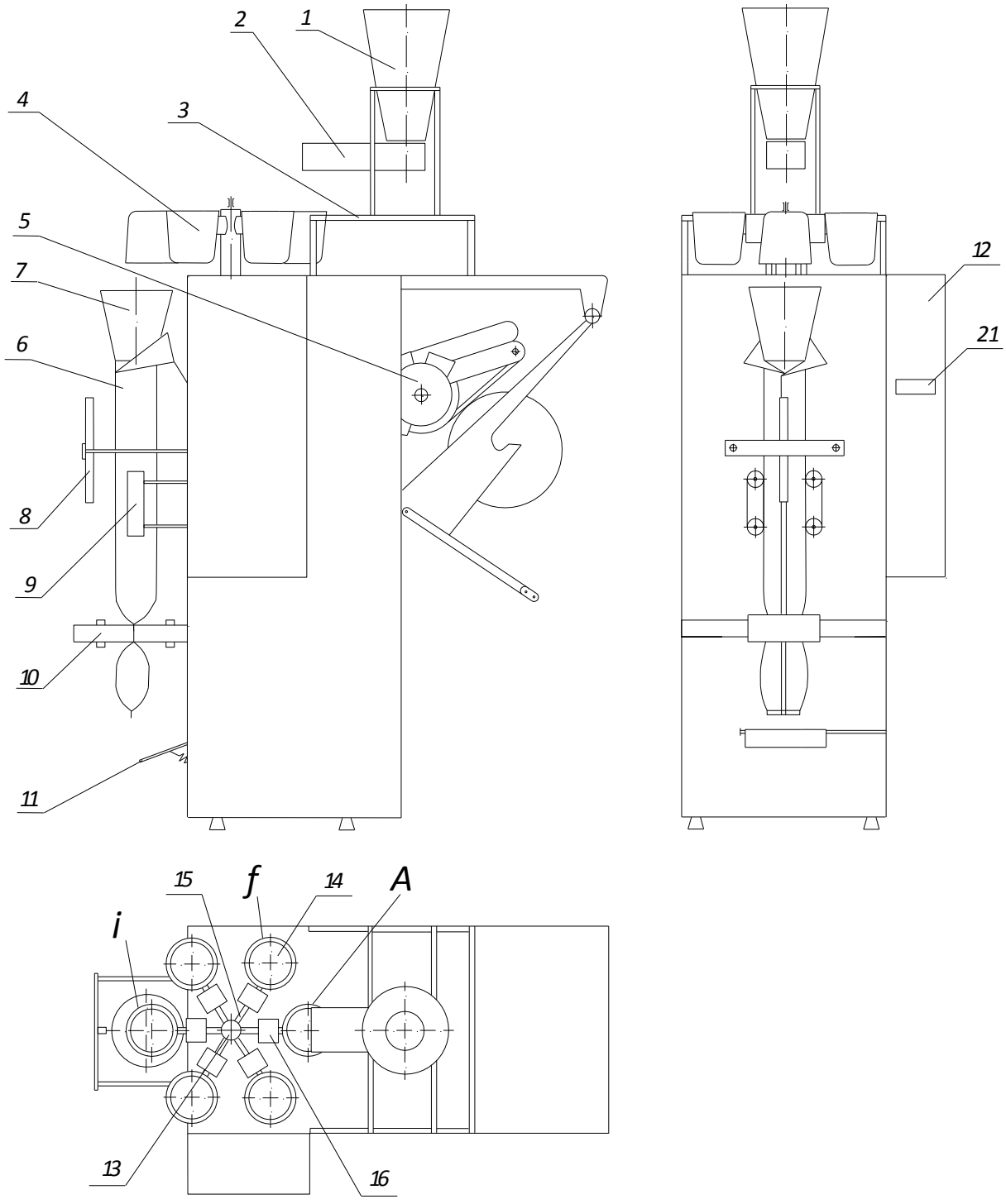


Рис. 5.2. Фасувально-пакувальна машина з гнучким зв’язком між блоками модулів: 1 – бункер; 2 – дозатор; 3 – рама; 4 – проміжний накопичувач відміряних доз матеріалу; 5 – механізм подачі плівки 6 – формувальна труба; 7 – приймальний бункер; 8 – механізм повздовжнього зварювання; 9 – механізм протяжки; 10 – механізм поперечного зварювання; 11 – пристрій для контролю виходу готового пакета; 12 – блок керування

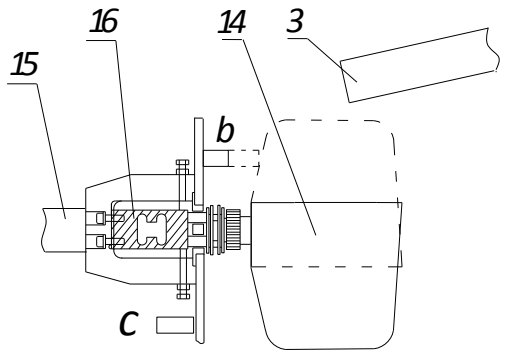


Рис. 5.3. Конструкція поворотної кишені

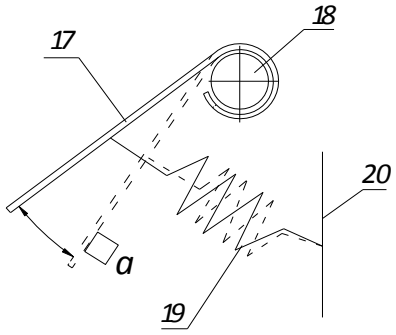


Рис. 5.4. Пристрій для контролю виходу готового пакету з машини

Машина працює таким чином. Сипкі матеріали із бункерів 1 потрапляють у відповідні дозатори 2, кожен з яких відміряє задану дозу сипкого матеріалу. Накопичувач 4 повертається на валу 13 і зупиняється при спрацюванні давача *c*. Це свідчить про те, що одна з кишень 14 розмістилась під виходом лотка подачі відміряних доз 3 (поз. А). Тоді відміряна дозатором доза матеріалу пересипаються в кишеню 14.

Водночас виготовлений пакувальним блоком готовий пакет падає на пластину 17 пристрою для контролю виходу готового пакету з машини 11, яка опускається під дією ваги пакета, провертаючись навколо вала 18 і натискає на давач *a*, який подає сигнал на блок керування 12 про вихід пакета. Після усунення навантаження пластина 17 повертається у вихідне положення завдяки пружині 19, яка прикріплена до опори 20.

У разі виходу готового пакета електромеханічний привід повороту 16 перевертає кишеню 14, яка в цей час знаходиться над входом у формувальну трубу 6 (поз. Б), навколо осі 15 дном вгору, внаслідок чого сипкий матеріал вивантажується з неї в приймальний бункер 7, звідки через формувальну трубу 6 потрапляє на запаковування у сформований механізмами повздовжнього 8 та поперечного 10 зварювання плівковий рукав, який опускається вниз з допомогою механізму протяжки 9. Після цього, не міняючи свого положення, кишеня 14 переміщується на наступну позицію під час чергового повороту накопичувача 4. Якщо пакет не вийшов, наповнена кишеня 14 залишається у положенні дном вниз і переміщується на сусідню позицію разом із розміщеною в ній дозою сипкого матеріалу.

Перед подачею дози матеріалу в накопичувач давач положення *b* перевіряє положення кишені 14 (поз. Д). Якщо вона розміщена дном вгору, то привід повороту 16 перевертає її дном вниз, після чого накопичувач 3 знову здійснює поворот на крок і цикл повторюється. Якщо у вказаній позиції сигнал від давача положення *b* відсутній, це означає, що всі кишені 14 наповнені, тому блок керування 12, отримавши відповідний сигнал від індикатора кількості вільних кишень 21, видає команду зупинити дозувальний блок.

Новий технічний результат виражається у підвищенні продуктивності машини внаслідок зниження тривалості її простоювань за рахунок забезпечення наявності запасу доз сипкого матеріалу.

На рис. 5.5 приведено схему процесу керування роботою машини.

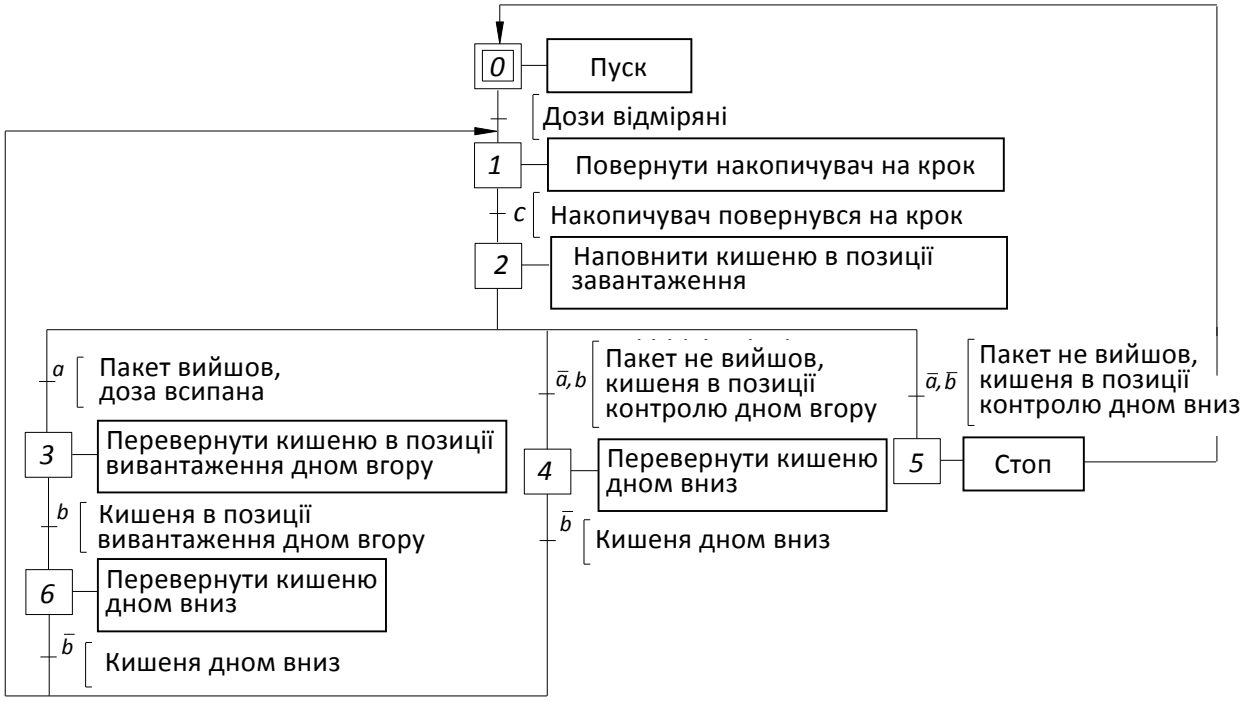


Рис. 5.5. Схема процесу керування роботою машини

Якщо часу відновлення працездатності ФМ, що відмовив, відповідає кількість можливих запасів у накопичувачі, то машина працюватиме безперебійно. Для цього необхідно правильно визначити його місткість. Початковими даними для цього є продуктивність ПМ $Q_{ц}$ і тривалість її роботи без поповнення запасів накопичувача τmax. Тоді місткість в кількості відміряних доз становитиме [35]:

$$VN = Q_{ц}\,\tau_{max}. \qquad (5.1)$$

При гнучкому зв'язку технічна продуктивність автомату визначається із виразу:

$$QT = \min (Q_{ц1} \cdot КГ1;\ Q_{ц2} \cdot КГ2;\ \ldots; Q_{цi} \cdot КГi;),$$

де $Q_{ц1}, Q_{ц2}, \ldots, Q_{цi}$ – циклові продуктивності ФМ автомату;

$КГ1, КГ2, \ldots, КГi$ – коефіцієнти готовності ФМ.

Для знаходження значення технічної продуктивності досліджуваних автоматів під час використання проміжного накопичувача розрахуємо її окремо для кожного БФМ.

5.2. Машина функціонально-модульної будови для багатокомпонентного дозування і пакування сипких речовин

Пакування кількох видів сипких речовин в одній упаковці набуває все більшого розповсюдження. Автоматизація цього процесу передбачає необхідність у використанні спеціального БФМ, який би відмірював дози в заданих пропорціях, потрібних для формування суміші, та подавав їх на пакування без участі людини.

На основі типової будови машини для пакування сипких речовин спроектовано схему компонування (рис. 5.6) та конструкцію машини для багатокомпонентного дозування і фасування сипких речовин (рис. 5.7) з використанням дозувально-фасувального БФМ, який складається із кількох окремих дозаторів, відповідної кількості завантажувальних бункерів, а також живильника, виконаного у вигляді похилого лотка, призначеного для об'єднання сформованих дозаторами доз в одну порцію та подачі її на запаковування [75].

Принцип роботи спроектованої машини наступний. Продукти з дозаторів 2 висипаються на лоток 3 після чого лоток нахиляється під кутом, при якому суміш пересипається у приймальний бункер 5. Полімерна плівка з рулону через направляючі ролики подається на рукавоутворювач 7 і протягується механізм протягування рукава 9 між формувальною трубою 6 та рукавоутворювачем 7. Після зупинки механізму протягування рукава губка 8 поздовжнього зварювання притискає плівку до труби, зварюючи поздовжній шов. Механізм поперечного зварювання і відрізання пакету 10 виконує одночасне зварювання верхнього шва нижнього пакету та нижнього шва

верхнього. При зварюванні виконується одночасно і відрізання нижнього пакету від верхнього вмонтованим у губки зварювання ножем.

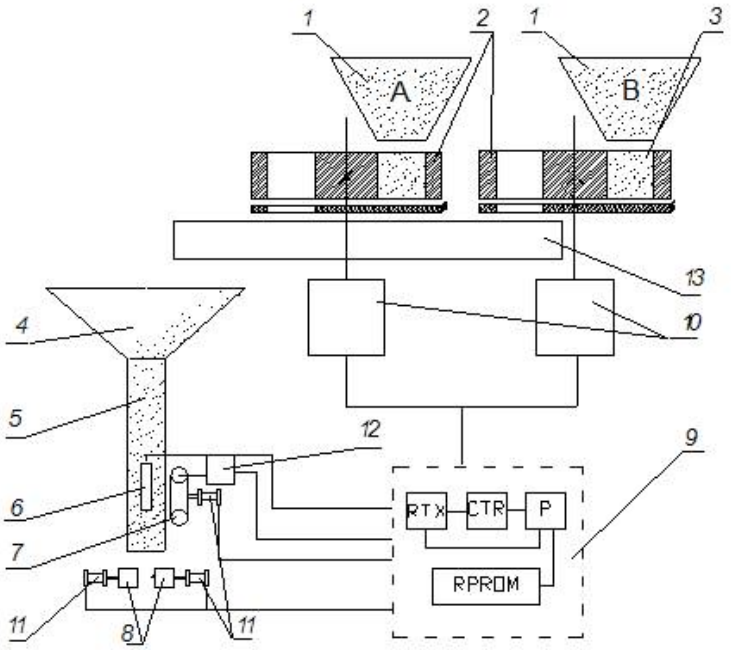


Рис. 5.6. Схема компонування машини для багатокомпонентного дозування сипких речовин: 1– бункери; 2 – дозатори; 3 – лоток; 4 – приймальний бункер; 5 – формувальна труба; 6 – губка зварювання поздовжнього шва пакета; 7 – механізм протягування рукава; 8 – губки зварювання поперечних швів пакета; 9 – блок керування; 10 – приводи вивантажування сипких компонент; 11 – пневмоциліндри; 12 – приводи переміщення рукава; 13 – лоток

Цей тип конструкції має ряд переваг: сипкі речовини, які входять до складу суміші, дозуються одночасно і незалежно одна від одної, а тому у разі необхідності можна змінювати кількість дозаторів відповідно до кількості компонентів суміші; а типорозмір дозатора підбирати залежно від гранулометричних властивостей відмірювального продукту та маси однієї дози.

Для підвищення універсальності по величині дози суміші сипких речовин до складу машини для багатокомпонентного дозування і пакування сипких речовин включено блок багатокомпонентного дозування, що включає бункери 1 та дозатори 2 з мірками 3 (рис. 5.8) [47].

Кожен дозатор дозує певний вид сипкої речовини та, при повороті на заданий крок, фасує відміряну порцію через приймальний бункер 4 в формувальну трубу 5. Потрібна кількість порцій для формування сумарної дози однієї й тієї ж сипкої речовини визначається кількістю послідовних поворотів дозатора. Якщо кількість чи величина порцій

різних компонентів суміші відрізняються між собою, дозатор, що відвантажив потрібну кількість порцій відключається та простоює до початку формування чергової дози суміші.

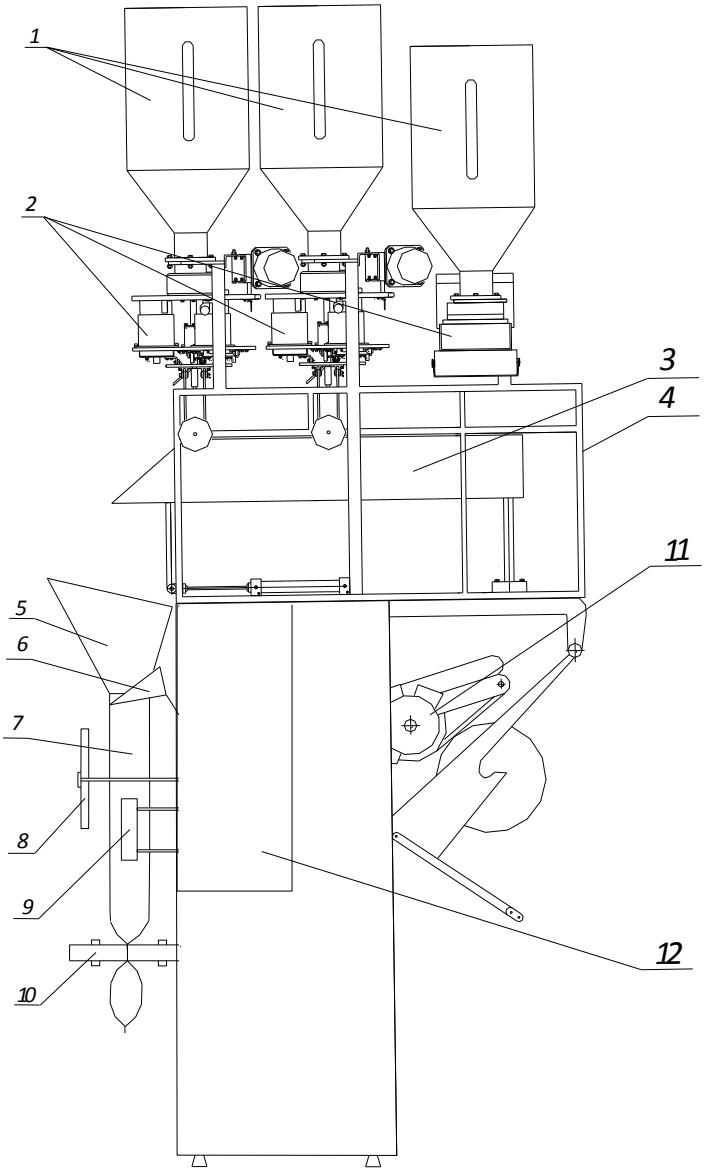


Рис. 5.7. Машина для багатокомпонентного дозування і пакування сипких речовин: 1 – бункер; 2 – дозатор; 3 – лоток; 4 – рама; 5 – приймальний бункер;6 – формувальна труба; 7 – рукавоутворювач; 8– механізму зварювання поздовжнього шва; 9 – механізм протягування рукава;; 10 – механізм поперечного зварювання і відрізання пакету; 11 – механізм подачі пакувального матеріалу; 12 – блок керування

Процес пакування реалізується таким чином. Губка зварювання поздовжнього шва 6 притискається до формувальної труби 5 для зварювання поздовжнього шва рукава, а губки зварювання поперечних

швів 8 змикаються пнемоциліндрами 11, утворюючи поперечні зварні шви та відрізаючи утворений пакет від рукава.

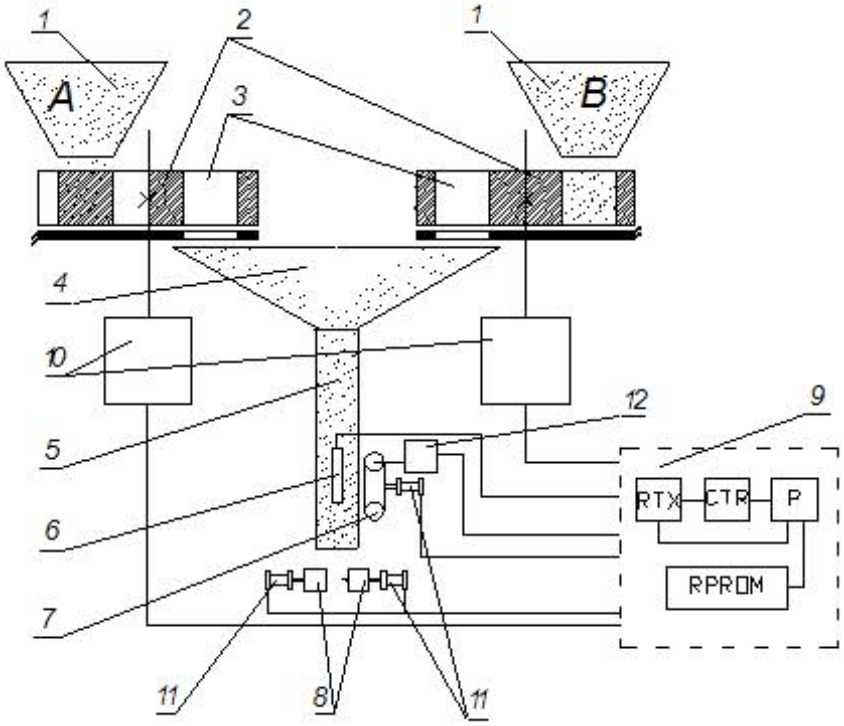


Рис. 5.8. Схема компонування машини для багатокомпонентного дозування сипких речовин: 1– бункери; 2 – дозатори; 3 – лоток; 4 – приймальний бункер; 5 – формувальна труба; 6 – губка зварювання поздовжнього шва пакета; 7 – механізм протягування рукава; 8 – губки зварювання поперечних швів пакета; 9 – блок керування; 10 – приводи вивантажування сипких компонент; 11 – пневмоциліндри; 12 – приводи переміщення рукава

Одночасно із цим відбувається обертання дозаторів 2 приводами 10, кожна із мірок 3 почергово встановлюється під відповідними бункерами 1, що містять компоненти суміші А та В, і відмірює задану дозу компонента, яка при переміщенні мірки 3 в положення над приймальним бункером 4, висипається в формувальну трубу 5. Після відмірювання заданої кількості доз обертання дозатора 2 припиняється.

Після завершення зварювання швів і завершення фасування останньої порції компонента суміші відбувається відведення губки зварювання поздовжнього шва 6 і губок зварювання поперечних швів 8, механізм протягування рукава 7 притискається до формувальної труби 5 пневмоциліндром 11 і приводиться в рух приводом 12, внаслідок чого здійснюється протягування рукава донизу. Величина переміщення рукава встановлюють кратною сумарній кількості вивантажених у фор-

мувальну трубу 5 мірок 3 всіх компонентів, необхідних для формування одного пакету.

Задання кількості порцій кожного компонента та керування роботою приводів вивантажування сипких компонент, утворення і переміщення рукавної заготовки здійснюють через керуючий програмний пристрій 9. Кількість вивантажених мірок 3 задають з допомогою програми керування, та встановлюють кратною співвідношенню компонентів в суміші, що задається кількістю імпульсів (сигналів).

5.3. Побудова віртуальних моделей функціонально-модульної структури технологічного устаткування

Моделі компонувань технологічного устаткування розрізнятимуться деталізацією відтворення в них компонентів – ФМ і зв’язків між ними. Окремі модифікації компоновок машин відрізнятимуться видом ФМ, їх кількістю і наявністю допоміжних ФМ.

Роглянемо приклад використання системи твердотільного проектування ProEngineer для побудови віртуальної моделі машини для пакування сипких продуктів (рис.5.9).

Процес проектування із 3-D моделей компоновок технологічних машин має три основних процедури:

1. створюються 3-D моделі усіх ФМ, з яких компонуватиметься майбутня машина;
2. із 3-D моделей ФМ проводиться синтез 3-D моделі компоновки машини;
3. виводяться креслення необхідних проекцій спроектованої машини з нанесенням необхідних розмірів**;**
4. виводяться креслення ФМ і їх деталей.

Розглянемо приклад застосування системи твердотільного проектування SolidWorks.

3-D модель машини для автоматичного пакування в’язких продуктів моделі АРРП, наприклад, включає біля двохсот п'ятдесяти деталей, об'єднаних у вузли і підвузли (рис.5.11). Програми твердотільного проектування дають можливість використовувати електронні версії мультимедіа каталогів 2D/3D, що надаються виробниками типових функціональних елементів технологічних машин.

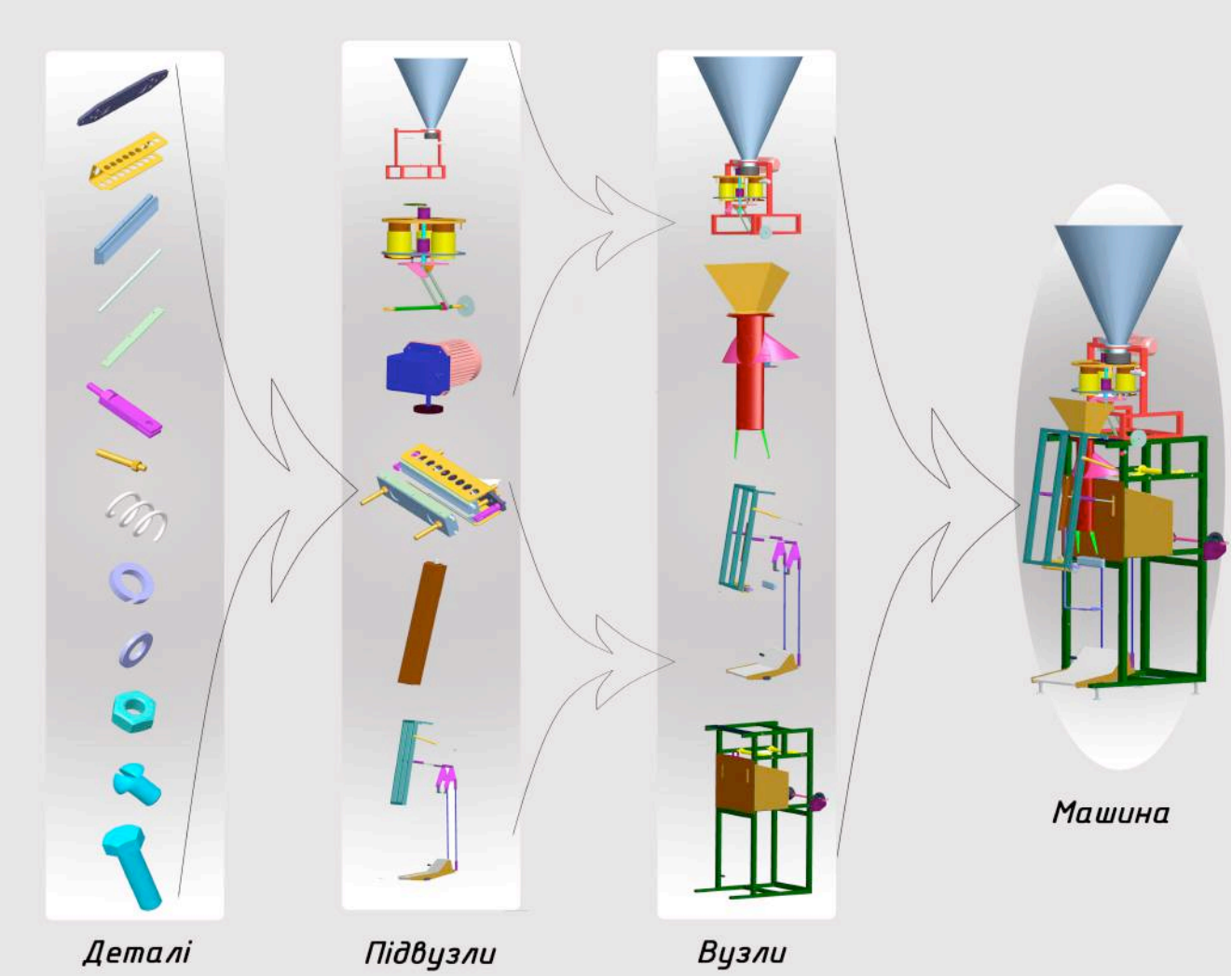


Рис.5.9. Схема формування компоновки машини для пакування сипких продуктів

Як приклад, покажемо використання електронного каталогу компанії Camozzi для пневмоелементів. Каталог дає можливість проектувальнику використовувати 3D-моделі пневматичних елементів та допоміжних пристроїв до них. Електронний макет об’єкта безпосередньо може бути вставлений в розроблювану компоновку машини.

3D-моделі мають всі необхідні геометричні та параметричні характеристики, що дозволяє перевірити її геометричну узгодженість з компоновкою обладнання. Системи 3D-моделювання мають також і інші програмні модулі, наприклад креслярський модуль, модуль маршрутизації, розрахункові модулі тощо.

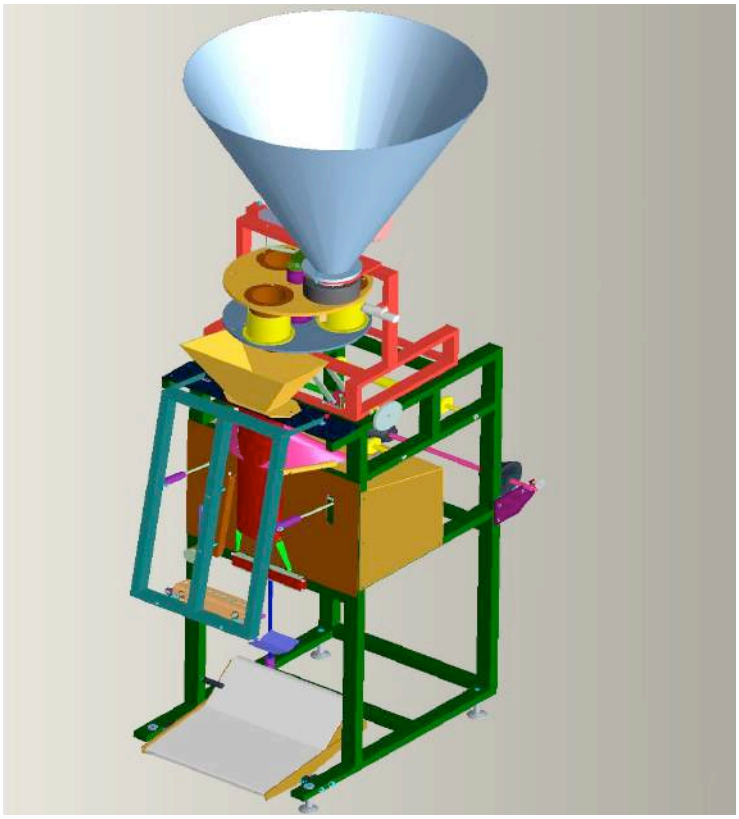


Рис. 5.10. Приклад 3-D моделі машини для пакування сипких продуктів

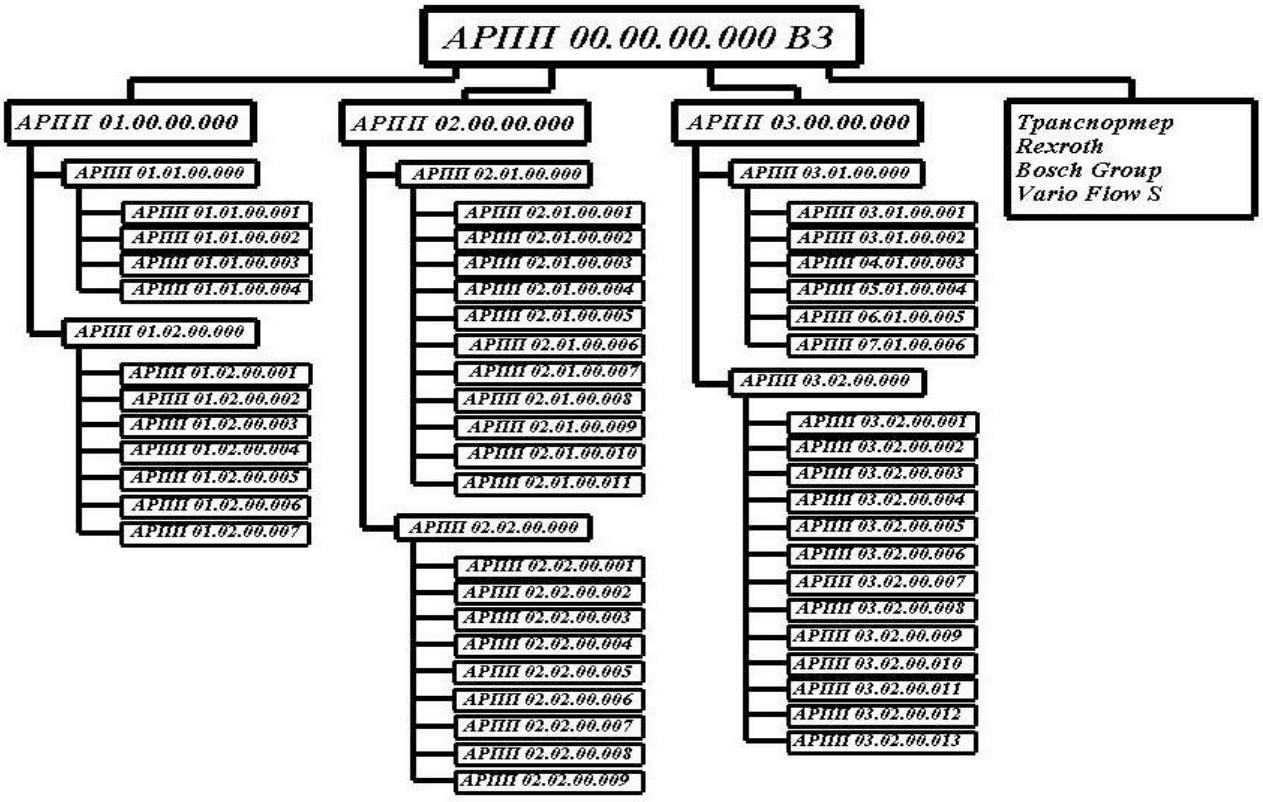


Рис. 5.11. Кодована система електронних моделей елементів машини

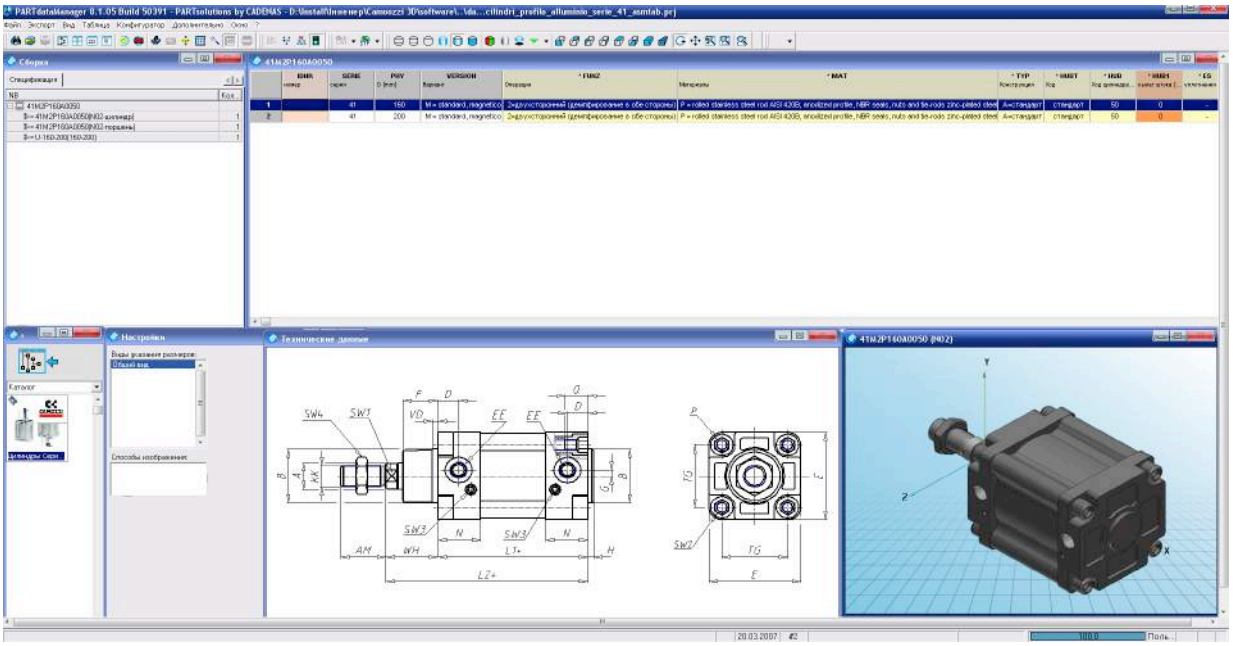


Рис.5.12. Приклад 3D-моделі пневмоциліндра з електронного каталогу

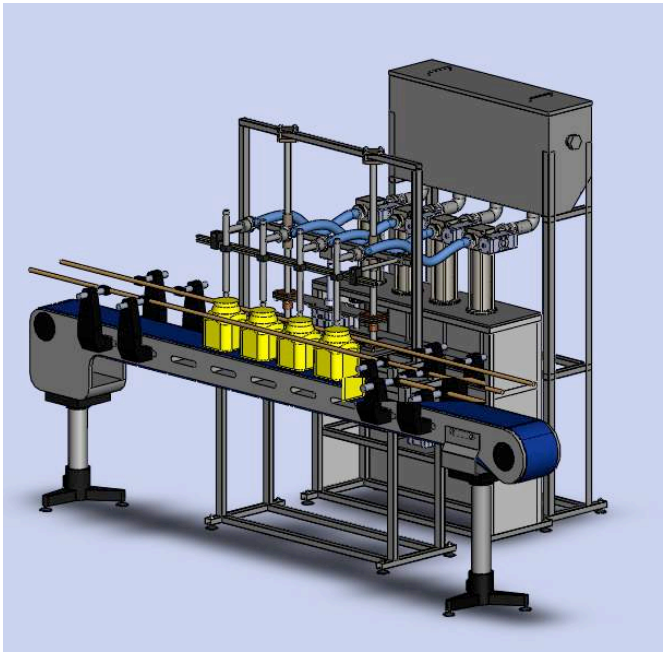


Рис. 5.13. 3D-модель технологічної машини для пакування в’язких продуктів

Креслярський модуль систем 3-D моделювання використовується для створення креслень деталей і складових одиниць. Креслення підтримує двонаправлену асоціативність із моделлю. Це значить, що зміна розміру в кресленні спричинить зміну моделі в 3D. І навпаки, зміна моделі в 3D, приведе до зміни креслення. Звичайне креслення містить плоскі (двомірні) види, аксонометричні (тривимірні) види, розміри, позначення й специфікації.

ВИСНОВКИ
(напрямки розвитку функціонально-модульної структури пакувальних машин)

На основі аналізу конструктивних особливостей машин для пакування сипких речовин встановлено, що їх структурний розвиток спрямований як на розширення функціональних можливостей машини, так і на підвищення показників ефективності її роботи, зокрема:

- *підвищення продуктивності* досягається скороченням тривалості дозування [41] та зварювання швів [80], а також багатопотоковим пакуванням в окремі пакети [53];
- *підвищення точності дозування* досягається розбиттям мірної камери дозатора на окремі секції [42, 43], поетапним заповнення мірної камери [52];
- *підвищення універсальності* машини спрямоване на виготовлення упаковок різних типорозмірів та забезпечується можливістю переналагодження механізму протяжки плівки [83], механізму поперечного зварювання [40, 44], пристрою центрування пакувального матеріалу [46];
- *автоматизація операції пакування* здійснюється за допомогою програмно керованого пристрою, який у різних машинах через відповідні давачі керує автоматичною роботою рухомих виконавчих механізмів [85, 87, 90], регулює роботу багатокомпонентного дозатора, що створює суміш із заданою пропорцією компонентів [51]; здійснює контроль положення стрічки пакувального матеріалу при її подачі на запаковування [46];
- *формування комплексних доз* з різних сипких речовин з подальшим пакуванням в один або окремі пакети [48, 51];
- *покращення якості упаковки* розвивається в двох напрямках. Наявність таких ФМ як механізм охолодження зварних швів [84], роликовий транспортер для відведення готових упаковок [97], опорні лапки для підтримування дна пакетів [89] направлена на підвищення її надійності й збереження цілісності; в той час як механізм формування внутрішніх бокових складок [81, 91], або підгортання дна упаковки [95], формування кутових швів на гранях пакету [96]; механізми розгладжування плівкового рукава в поперечному

напрямку [87, 88] вдосконалюють естетичний вигляд та споживчі властивості упаковки.

Доцільність та ефективність наведених запатентованих розробок доведена їх активним впровадженням у виробництво як вітчизняними, так і зарубіжними виробниками машин для пакування сипких речовин [98-110] (приклади моделей таких машин представлені на рис. 2.24, 2.25). Та поруч з тим, розвитку структури ПМ притаманний такий негативний аспект як заміна ефективного вдосконалення структури машин їх частковою модернізацією.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аверьянов О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ / О.И. Аверьянов. – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.

2. Автоматизация процесов машиностроения: Учеб. пособие для машиностр. спец. Вузов / Я. Буда, В. Гановски, В.С. Вихман и др.; Под ред. А.И. Дащенко. – М.: Высш. Шк., 1991. – 480 с.

3. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: у 3-х част.: навч. посіб. для ВНЗ / Під заг. ред. Ю.М. Кузнєцова. − Частина 1. Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання. − Кіровоград, 2003. – 422 с.

4. Андреев Л.В. О совместительстве в мире конструкций / Л.В. Андреев. – Машиностроитель, 1991. – № 504. – С. 6-9.

5. Ахрем А.А., Рахманкулов В.З. Виртуальное проектирование и принятие решений / А.А. Ахрем., В.З. Рахманкулов // Автоматизация проектирования, 1997. – № 4.

6. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. − М.: Машиностроение, 2001. − 368 с.

7. Базров Б.М. Совершенствование машиностроительного производства на основе модульной технологии // Станки и инструмент, 1985. − № 10. − С. 22-25.

8. Божко А.Н. Структурный синтез на элементах с огранитенной сочетаемостью / А.Н. Божко, А.Ч. Толпаров // Инженерное образование. – 2004. – № 5. – С. 18−26.

9. Быков В.П. Методическое обеспечение САПР в машиност.-роении / В.П. Быков. – Л.: Машиностроение, 1989. – 255 с.

10. Вендров А.М. Методические основы технологий создания програм-много обеспечения [Електронний ресурс] / А.М. Вендров // Jet Info Online. – 2004. – № 4. – Режим доступу: http://citforum.ru/programming/application/program/1.shtml#4.

11. Вязгин В.А. Математические методы автоматизированного проектирования / В.А. Вязгин, В.В. Фёдоров. – М.: Высшая школа, 1989.

12. Базров Б.М. Совершенствование машиностроительного производства на основе модульной технологи / Б.М. Базров // Станки и инструмент, 1985. – № 10. – С. 22−25.

13. Васильев А.Л. Модульный принцип формирования техники / А.Л. Васильев. − М.: Издательство стандартов, 1989. − 238 с.

14. Дащенко А.И. Технологические основы агрегатирования сборочного оборудования / А.И. Дащенко, И.И. Ламин, Ю.М. Золотаревский. – М: Машиностроение, 1990.

15. Дворянкин А.М. Методы синтеза технических решений / А.М. Дворянкин, А.И. Половинкин, А.Н. Соболев. – М.: Наука, 1977. – 104 с.

16. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных призводственных систем / Г.В. Дружинин. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

17. Дэвид А. Марка, Клемент МакГоуэн. Методология структурного анализа и проектирования SADT (Structured Analysis & Design Technique) [Електронний ресурс] / Дэвид А. Марка, Клемент МакГоуэн. – Электронная БИБЛИОТЕКА, 1999. – 284 с. – Режим доступу: http://www.interface.ru/fset.asp?Url=/case/sadt0.htm.

18. Гавва О.М. Пакувальне обладнання в 3 кн. – 1 кн. Обладнання для пакування продукції у споживчу тару / О.М. Гавва, А.П. Безпалько, А.І. Волчко [За ред. О.М. Гавви]. – Київ: ІАЦ «Упаковка», 2008. – 436 с.

19. Гліненко Л.К. Основи моделювання технічних систем / Л.К. Гліненко, О.Г. Сухоносов. – К.: Освіта, 1996.– 180 с.

20. Гусарев В.С. Синтез структурных П-схем машин автоматического действия / В.С. Гусарев // Научные записки Одесского политехнического института, 1961. – Т 35.

21. ЕСТПП. Организация автоматизированного технологического проектирования: ГОСТ 14.416-83. − М.: Изд. Стандартов, 1983.

22. Ивахненко А.Г. Компьютерное проектирование компоновок технологического оборудования / А.Г. Ивахненко, А.С. Худяков // Тез. докл. междун. научн.-практ. конф. "Информационные технологгии в образовании, управлении и промышленности", ч.2, Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 1996. – С. 13−15.

23. Зелінський А.М. Основи математичного моделювання / А.М. Зелінський. – К.: НМКВО, 1992. – 220 с.

24. Каверин В. Все по науке [Електронний ресурс] / В. Каверин // PakkoGraff. – 2005. – № 1. – Режим доступу до журн.: http://www.pakkograff.ru/reader/articles/equipment/pack/192.php.

25. Кандырин Ю.В., Шкурина Г.Л. Процедуры генерации и выбора при проектировании технических объектов / Ю.В. Кандырин, Г.Л. Шкурина. – Волгоград: ВолГТУ, 1999.

26. Классификация оборудования для упаковки продуктов в термосвариваемые пакеты [Електронний ресурс] / В. Ульянов // Пакет. – 2004. – №2. – Режим доступу до журн.: http://www.kursiv.ru/kursivnew/paket_magazine/archive/25/8.php.

27. Краснощёков П.С. Автоматизация проектирования сложных объектов машиностроения / П.С. Краснощёков, Г.И. Савин, В.В. Фёдоров, Ю.А. Флёров // Автоматизация проектирования, 1996. – № 1. – С. 3−13.

28. Кузьмиченко Б.М. Структурно-компоновочные принципы построения гибкого сборочного оборудования / Б.М. Кузьмиченко // Научно-технический журнал “Вестник НОУ-ХАУ”. − № 2. − Москва, 1993. − С. 104-106.

29. Курицкий Б.Я. Оптимизация вокруг нас / Б.Я. Курицкий. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 144 с.

30. Масло М.А. Деякі аспекти вибору раціональних параметрів робочих органів пакувальних машин / М.А. Масло // Упаковка. – 2008. – № 6. − с. 38-39.

31. Митяшин Н.П. Системообразующие принципы построения электротехнических комплексов с изменяемом структурой / Н.П. Митяшин, Б.М. Кузьмиченко, Ю.Б. Томашевский // Автоматизация и современные технологи. − №4. − 2003. − С. 7-13.

32. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000.

33. Норенков И.П. Основы теории и проектирования САПР: Учебник для вузов / И.П. Норенков, В.Б. Маничев. – М.: Высшая школа, 1990. – 335 с.

34. Павловский Ю.Н., Смирнова Т.Г. Проблема декомпозиции в матема-тическом моделировании / Ю.Н. Павловский, Т.Г. Смирнова. – М.: Фазис, 1996

35. Пальчевський Б.О. Автоматизація технологічних процесів (виготовлення і пакування виробів): навч. посіб. / Б.О. Пальчевський. – Львів: Світ, 2007. – 392 с.

36. Пальчевський Б.О. Автоматизований синтез технологічних машин / Б.О. Пальчевський // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. Випуск 26. − Луцьк, 2009. − С. 266−270.

37. Пальчевский Б.О. Основи САПР пакувального обладнання: навч. посіб. / Б.О. Пальчевский, О.А. Крестьянполь, Б.П. Валецький,

Д.В. Бондарчук, В.С. Рак. [За ред. проф. Б.О. Пальчевського] – Луцьк.: РВВ ЛНТУ, 2008. – 160 с.

38. Пальчевський Б.О. Принципи побудови і сучасні тенденції розвитку методів проектування технологічного обладнання (на прикладі пакувального виробництва) // Технологічні комплекси. Науковий журнал. Випуск 1. – Луцьк. – 2010. – С. 3–9.

39. Пат. № 2096281 С1 Российской Федерации, МПК B65B9/06. Фасовочно-упаковочная машина / Лукьянов С.В., Гноевых А.Е. – № 98109028/13; Заявл. 20.05.1998; Опубл. 27.06.1999. – 2 с.

40. Пат. № 29678 А України, МПК B65B 9/00. Пристрій для виготовлення, наповнення та запечатування пакетів із стрічкового термосклеювального матеріалу / Босак М.Я. – № 96103857; Заявл. 09.10.1996; Опубл. 15.11.2000. Бюл. № 6. – 4 с.

41. Пат. № 38477 U України, МПК B65B 9/00. Автомат для пакування сипких продуктів / Піддубний Ю.О.– № u200904352; Заявл. 05.05.2009; Опубл. 25.09.2009. Бюл. № 18. – 8 с.

42. Пат. № 42895 U України, МПК G01G 11/00. Пристрій дозування сипких матеріалів / Бондарчук Д.В., Пальчевський Б.О. – № u200901791; Заявл. 02.03.2009; Опубл. 27.07.2009. Бюл. № 14. – 6 с.

43. Пат. № 42896 U України, МПК G01F 11/00. Спосіб дозування матеріалів / Бондарчук Д.В., Пальчевський Б.О. – № u200901792; Заявл. 02.03.2009; Опубл. 27.07.2009. Бюл. № 14. – 5 с.

44. Пат. № 44269 U України, МПК B65B 9/00. Виконавчий пристрій установки для виготовлення, наповнення і герметизації пакетів з термо-пластичної плівки / Піддубний Ю.О. − № u200904352; Заявл. 05.05.2009; Опубл. 25.09.2009. Бюл. № 18. – 8 с.

45. Пат. № 54468. Фасувально-пакувальна машина / Пальчевський Б.О., Крестьянполь О.А., Шаповал О.М. – № u201005601; Заявл. 11.05.2010; Опубл. 10.11.2010. Бюл. № 21. – 4 с.

46. Пат. № 55345 U1 Российской Федерации, МПК B65B 41/12. Устройство для центрирования упаковочного материала / Краснов Н.А. – №2006105095/22;Заявл. 08.02.2006; Опубл. 08.02.2006. Бюл. № 22. – 2 с.

47. Пат. № 70136. Спосіб багатокомпонентного фасування сипких матеріалів в полімерний пакет / Пальчевський Б.О., Крестьянполь О.А., Вараніцький Т.Л., Шаповал О.М. – № u201114004; Заявл. 28.11.2011; Опубл. 25.05.2012. Бюл. №10. − 4 с.

48. Пат. № 71631 U1 Российской Федерации, МПК B65B19/34. Устройство для автоматического дозирования и упаковки сыпучих и штучных продуктов / Скрыпник В.А., Селезнев С.О. – № 2007129359/22; Заявл. 30.07.2007; Опубл. 20.03.2008. Бюл. № 8. – 2 с.

49. Пат. № 71632 U1 Российской Федерации, МПК B65B 53/02. Узел охлаждения пакетов термоусадочной упаковочной машины / Антохин И.А., Фомин В.Л. – № 2006122359/22; Заявл. 22.06.2006; Опубл. 20.03.2008. – 2 с.

50. Пат. № 75372 U1 Российской Федерации, МПК B65B 9/20. Фасовочно-упаковочная машина с устройством крепления пакетов к полосе /Данишевский В.А., Селезнев П.А. – № 2008112395/22; Заявл. 31.01.2008; Опубл. 10.08.2008. Бюл. № 22. – 2 с.

51. Пат. № 8907 U України, МПК 7 G01G11/00. Спосіб багато-компонентного дозування сипкого матеріалу / Акулін В.В., Бісюк В.А., Віхрова Л.Г., Бобрицький В.М. – № u200502779; Заявл. 28.03.2005; Опубл. 15.08.2005. Бюл. № 8. – 2 с.

52. Пат. № 9758 C2 України, МПК 6 B65B9/06. Пристрій для виготовлення, наповнення продуктом і запечатування пакетів з термопластичного матеріалу / Задворняк С.К., Кобилюх Б.П., Яхимович С.В., Гончарова І.В., Гунька І.Й. – № 95094074; Заявл. 07.09.1995; Опубл. 15.05.2002. Бюл. № 5. – 3 с.

53. Плоские пакеты [Електронний ресурс] / В. Ульянов // Пакет. – 2003. – №3. – Режим доступу до журн.: http://www.kursiv.ru/kursivnew/paket_magazine/archive/26/14.php.

54. Повилейко Р. Архитектура машины / Р. Повилейко. – Новосибирск: Западно-Сибирское книжное издательство, 1974.

55. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений / В.В. Подиновский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 64 с.

56. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 256 с.

57. Полуавтомат фасовочно-упаковочный УФС-18 ПА: паспорт инструкции по установке и експлуатации. − К.: Завод упаковочного оборудования “Баленко”, 2003.

58. Пристрої устаткування для пакування функціональні. Терміни та визначення: ДСТУ 2379-94. – К.: Держстандарт України, 1995. – 21 с. – (Державний стандарт України).

59. Проектирование оптимальных технологических систем машин / Под ред. А.И. Дащенко. – М.: Машиностроение, 1989. – 334 с.

60. Романенко В.Д. Методи автоматизації прогресивних технологій: Підручник / В.Д. Романенко. – К.: Вища школа, 1995. – 519 с.

61. Смирнов О.Л. САПР: формирование и функционирование проектных модулей / О.Л. Смирнов, С.Н. Падалко, С.А. Пиявский. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.

62. Теоретические основы системного анализа / Под ред. В.И. Новосельцева. – М.: Майор, 2006. – 592 с.

63. Термінологічний довідник пакувальника / Сторіжко Й.І., Гавва О.М., Беспалько А.Г., Волчко А.І. Київ: ІАЦ « Упаковка», 1999. – 80 с.

64. Устаткування для пакування харчових продуктів. Терміни та визначен-ня: ДСТУ 2515-94. – К.: Держстандарт України, 1995. – 26 с. – (Державний стандарт України).

65. Феклин К.П. Основы структурно-параметрического синтеза упаковочных машин / К.П. Феклин // Тара и упаковка. – 2001. – № 6.

66. Хомяков В.С. Кодирование компоновок металообрабатывающих станков при их автоматизированном проектировании / В.С. Хомяков, И.И. Давыдов // Станки и інструмент, 1989. – № 9. – С. 8−11.

67. Цвиркук А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем / А.Д. Цвиркук. – М.: Наука, 1982. – 200 с.

68. Чернов М.Е. Упаковка сыпучих продуктов: учеб. пособ. / М.Е. Чернов. − М.: ДеЛи, 2000. − 163 с.

69. Чикунов С.В. Поэтапный выбор в моделях многокритериальной оптимизации / С.В. Чикунов, Ю.В. Бугаев, А.И. Бубнов // Повышение эффективности методов и средств обработки информации: Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции / Тамбов, воен. авиац. инжен. ин-т. – Тамбов, 2000. – С. 197−198.

70. Шаповал О.М. Автоматизація розв’язку багатокритеріальної задачі структурної оптимізації пакувального автомату / Б.О. Пальчевський, О.М. Шаповал // Технологічні комплекси. Науковий журнал. Випуск 1. – Луцьк. − 2010. – С. 33−39.

71. Шаповал О.М. Аналіз методів оптимізаційного синтезу технологічних машин / Б.О. Пальчевський, О.М. Шаповал // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. Випуск 24. − Луцьк. – 2008. − С. 424−431.

72. Шаповал О.М. Багатокритеріальна оптимізація структури пакувальних автоматів / Б.О. Пальчевський, О.М. Шаповал // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. − Львів. – 2009. − № 43. – С. 115−120.

73. Шаповал О.М. Застосування методу віток і меж для оптимізації структури технологічних машин / Б.О. Пальчевський, О.М. Шаповал // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. Випуск 26. − Луцьк. – 2009. − С. 219−224.

74. Шаповал О.М. Напрями розвитку будови машин для пакування сипких речовин / Б.О. Пальчевський, О.М. Шаповал // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. Випуск 28. – Луцьк. – 2010. – С. 386−392.

75. Шаповал О.М. Особливості конструкції модуля багато компонентного дозування сипких матеріалів / І.І. Семенюк, О.М. Шаповал // Тези XXXIII студентської науково-технічної конференції «Україна сьогодні: інтеграція освіти і науки» (технічний напрямок). – Луцьк: ННВ Луцький НТУ, 2010. – С. 102−103.

76. Шаповал О.М. Програмне забезпечення автоматизованого пошуку оптимального компонування пакувального автомату / Б.О. Пальчевський, О.М. Шаповал // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. − Львів. – 2010. − № 44. – С. 90−95.

77. Шаповал О.М. Стратегії оптимізаційного синтезу технологічних машин/ Б.О. Пальчевський, О.М. Шаповал // Технологічні комплекси. Науковий журнал. Випуск 1(3). – Луцьк. – 2010. – С. 3−11.

78. Шаповал О.М. Формализация процедуры декомпозиции служебной функции при формирования структуры технологической машины / Б.О. Пальчевский, О.М. Шаповал // Автоматизация: проблемы, решения: материалы международной научн.-техн. конф. − Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. – С. 137−139.

79. Шувалова Л.А. Методы абстрактного синтеза структуры и послідовательности выполнения операций фасовочно-упаковочных

машин / Л.А. Шувалова // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2005. – № 4. – С. 55−58.

80. Pat. № 4512138 United States, B65B 9/00. Form, fill and seal machine with hot gas and thermal impuls sealing / Eddie L. Greenavalt, Lake Jackson. – № 354589; Filed Mar. 4, 1982. – 9 p.

81. Pat. № 4562691 United States, B65B 31/04. Vertical packaging machine for bags with erectable self-suppofting tensile structyre with flat bottom / Gino Rapparini. – № 476942; Filed Jan. 7, 1986. – 8 p.

82. Pat. № 4571926 United States, B65B 9/10. Apparatus for forming, filling and depositing them into cartons / John W. Scully. – № 374002; Filed May. 3, 1982. – 15 p.

83. Pat. № 4660356 United States, B65B 9/08. Step feed device for bag filling machine / Michael Paolo Simionato. – № 782675; Filed Oct. 2, 1985. – 5 p.

84. Pat. № 4719741 United States, B65B 9/08. Cross seal cooling for vertical form, fill, seal apparatus / James R. Mabry. – № 938939; Filed Dec. 8, 1986. – 5 p.

85. Pat. № 4800707 United States, B65B 9/10. Vertical form, fill and seal packaging machine with servo motor drive means / Horst Rabus, Broag Brook, Conn. – № 135175; Filed Dec. 4, 1987. – 10 p.

86. Pat. № 4924656 United States, B65B 63.02. Forming, filling and sealing bags and depositing them into cartons / Lloyd Kovacs, Matthew R. Lind. – № 248796; Notice Feb. 28, 2006; Filed Sep. 23, 1988. – 35 p.

87. Pat. № 5014497 United States, B65B 9/06. Method and apparatus for smoothing of bag making material in form, fill and seal machines / Michael J. McMahon. – № 490839; Filed Mar. 6, 1990. – 4 p.

88. Pat. № 5048270 United States, B65B 9/06. Wrinkle free film spreader device for form, fill and seal machines / Michael J. McMahon. – № 470807; Filed Jan. 26, 1990. – 7 p.

89. Pat. № 5054270 United States, B65B 9/20. Bag support/spreader vertical form, fill and seal machine / Michael J. McMahon. – № 493618; Filed Mar. 15, 1990. – 6 p.

90. Pat. № 5485712 A United States, B65B 9/00. Method of handling film on a vertical form, fill and seal machine / Dale M. Cherney, Hovards Grove. – № 379849; Filed Jan. 27, 1995. – 10 p.

91. Pat. № 5685132 A United States, B65B 9/20. Bag forming, filling and sealing machine / Barend Baastian Romijn. – № 640963; Filed Mar. 9, 1996. – 7 p.

92. Pat. № 6052971 United States, B65B 9/00. Offset stripper and stripping method for vertical form, fill and seal machine / James Henry Malsam, Larry Gene Swan. – № 09/188644; Filed Nov. 9, 1998. – 16 p.

93. Pat. № 6079469 United States, B29C 65/02. Transverse seam sealing device for a bag forming and filling machine / Willi Stirnkorb, Martin Beck. – № 09/043862; Filed Sep. 19, 1996. – 4 p.

94. Pat. № 6088994 A United States, B65B 9/06. Packaging machine incorporating device for adjusting position for cutting bads / Yukio Nakagawa, Masashi Kondo. – № 09/306481; Filed Jul. 18, 2000. – 16 p.

95. Pat. № 6212861 Bl United States, B65B 9/20. Forming, filling and sealing machine machine for standing pouch / Orihiro Tsuruta. – № 09595026; Filed Jun. 16, 2000. – 43 p.

96. Pat. № 6428456 B1 United States, B31B 1/64. Apparatus for forming tubular containers with reinforced edges and containers / Sergio Visona, Giorgio Trani, Marion Sterner. – № 09/601206; Filed Aug. 6, 2002. – 7 p.

97. Pat. № 6826892 B2 United States, B65B 61/28. Vertical form, fill and seal machine for handling large pouches / Roland Basque. – № 10339826; Filed Jan. 9, 2003. – 17 p.

98. http://www.balenko.com.ua

99. http://www.lidiya.ru

100. http://www.intermash.kiev.ua

101. http://www.tokom.com.ua

102. http://www.agroservis.kharkov.ua

103. http://www.omag.com.ua

104. http://www.rupas-pack.com.ua

105. http://www.signal-pack.com.ua

106. http://www.elopack.kiev.ua

107. http://www.velteko.com

108. http://www.okant.ru

109. http://www.termopak.msk.ru

110. http://www.r-t.ru

111. http://www.ipico.com.ua/katalog_oborudovaniya/dater_chernilnyj/

ЗМІСТ

ВСТУП 3

РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи функціонально-модульного проектування пакувальних машин 6

1.1. Загальні положення процесу проектування……. 6
1.2. Розвиток теорії функціонально-модульного проектування технологічних машин……..... 9
1.3. Методологія автоматизованого проектування технологічних машин……...15
1.4. Постановка проблеми оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури машин для пакування сипких речовин……. 19

РОЗДІЛ 2. Концепція створення нових технологічних машин для пакування сипких речовин 21

2.1. Технологія пакування сипких речовин…….. 21
2.2. Функціональні пристрої як функціонально-модульна база машини для пакування сипких речовин……... 23
2.3. Аналіз компонувальних схем функціонально-модульної структури машин……. 26
2.4. Аналіз розвитку функціонально-модульної бази машин для пакування сипких речовин……. 35
2.4.1. Конструкції типових функціональних модулів дозувального-фасувального блоку…… 40
2.4.2. Конструкції типових функціональних модулів пакувального блоку……. 47
2.5. Концептуальні умови створення нових пакувальних машин і модифікації їх функціонально-модульної структури…….. 67

РОЗДІЛ 3. Теоретичні засади формалізації опису функціонально-модульної структури пакувальних машин 70

3.1. Види моделей опису пакувальних машин 70
3.2. Моделювання послідовності виконання елементів

технологічної операції пакування…….. 76
3.3. Графічне моделювання послідовності виконання технологічної операції пакування сипких речовин…….. 78
3.4. Моделювання структури машин для пакування сипких речовин…… 84

РОЗДІЛ 4. Засади оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури машин для пакування сипких речовин 95

4.1. Структура основних процедур оптимізаційного синтезу……. 95
4.2. Процедура генерування варіантів структури ПМ……..... 101
4.3. Загальна схема одноетапного і багатоетапного оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури машин для пакування сипких речовин…….. 104
4.4. Застосування багатокритеріального поетапного вибору рішень при оптимізаційному синтезі функціонально-модульної структури машини ……..……... 107
4.5. Оптимізаційний синтез базової функціонально-модульної структури машини методом гілок і меж……. 114
4.6. Багатокритеріальний оптимізаційний синтез функціонально-модульної структури машини пошуком Парето-ефективних Рішень……. 129

РОЗДІЛ 5. Приклади оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури машин для пакування сипких речовин .. 140

5.1. Машина функціонально-модульної будови для пакування сипких речовин з гнучким зв’язком між її компонентами……. 140
5.2. Машина функціонально-модульної будови для багатокомпонентного дозування і пакування сипких речовин……. 145
5.3. Напрямки розвитку функціонально-модульної структури пакувальних машин……... 149

ВИСНОВКИ 153

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 155

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

Пальчевський Б.О., Шаповал О.М., Великий О.А.

Наукове видання

ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ СИНТЕЗ ФУНКЦІОНАЛЬНО-МОДУЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ПАКУВАЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ

Монографія

Редакційно-видавничий відділ Луцького НТУ
Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК №4123 від 28.07.2011 р.

В авторській редакції
Комп'ютерна верстка О. Шаповал

Підписано до друку 30.05.2013 р.
Формат 60 х 84/16. Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 10,3. Обл. вид. арк. 9,0. Тираж 300 пр.
Зам. № 309

Друк РВВ Луцького НТУ, 43018, м. Луцьк, вул. Львівська
Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК №4123 від 28.07.2011 р.

Пальчевський Б.О.

П14 Оптимізаційний синтез функціонально-модульної структури пакувального устаткування: монографія / Б.О. Пальчевський, О.М. Шаповал, О.А. Великий. – Луцьк: Луцький НТУ, 2013. – 165 с.

ISBN 978-617-672-038-6

Особливістю монографії є представлення основ побудови функціонально-модульної структури пакувальних машин та методів її проектування з використанням сучасних інформаційних технологій комбінаторного структурного синтезу і оптимізації. Розроблена методика автоматизованого проектування включає генерування варіантів і оптимізацію компоновки технологічного обладнання, її твердотільне віртуальне моделювання, а також отримання на основі цих моделей робочої документації. У даній монографії вперше описано поєднання системного підходу і функціонально-модульного представлення технологічного устаткування з використанням основних інформаційних технологій проектування, їх процедур та операцій. Показано на чисельних прикладах їх практичне застосування для проектування конкретних видів технологічного устаткування для пакування сипких речовин. Для наукових працівників, аспірантів, інженерних працівників, що займаються проектуванням технологічного обладнання.

УДК 621.798.002.5(066)
ББК 34.687.в6